Série de la Protection de l'environnement

Sort et persistance du pétrole brut échoué : survol sur neuf années du projet BIOS, île de Baffin (T.N.-O.), Canada

Rapport SPE 3/SP/4
Mars 1992

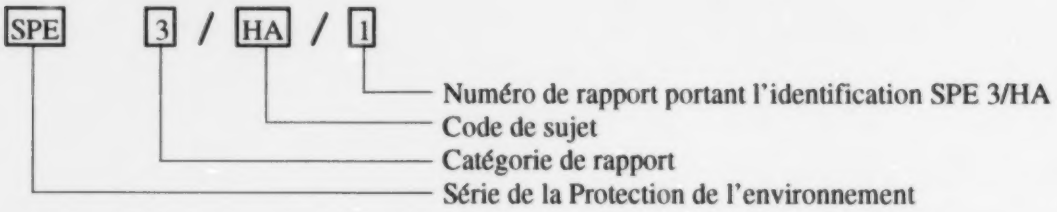
Canada

Environnement Canada | Environment Canada

92-04387/

SÉRIE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotation :



Catégories

1 Règlements/Lignes directrices/ Codes de pratiques
2 Évaluation des problèmes et options de contrôle
3 Recherche et développement technologique
4 Revues de la documentation
5 Inventaires, examens et enquêtes
6 Évaluations des impacts sociaux, économiques et environnementaux
7 Surveillance
8 Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9 Guides

Sujets

AG Agriculture
AN Technologie anaérobie
AP Polluants atmosphériques
AT Toxicité aquatique
CC Produits chimiques commerciaux
CE Consommateurs et environnement
CI Industries chimiques
FA Activités fédérales
FP Traitement des aliments
HA Déchets dangereux
IC Chimie inorganique
MA Pollution marine
MM Exploitation minière et traitement des minéraux
NR Régions du Nord et rurales
PF Papier et fibres
PG Production d'électricité
PN Pétrole et gaz naturel
RA Réfrigération et climatisation
RM Méthodes de référence
SF Traitements de surface
SP Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM Méthodes de référence normalisées
TS Systèmes de transport
TX Textiles
UP Pollution urbaine
WP Protection/préservation du bois

Des sujets et des codes additionnels sont ajoutés au besoin. On peut obtenir une liste des publications de la SPE en s'adressant aux Publications de la Protection de l'environnement, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.

Printed on recycled paper

Imprimé sur du papier recyclé

Sort et persistance du pétrole brut échoué : survol sur neuf années du projet BIOS, île de Baffin (T.N.-O.), Canada

par

B. Humphrey
The Seakem Group
Sidney (C.-B.), Canada

E.H. Owens
Woodward-Clyde Consultants
Seattle (Washington), États-Unis

G.A. Sergy
Direction du développement technologique
Environnement Canada
Edmonton (Alberta), Canada

Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada

Rapport SPE 3/SP/4
Mars 1992

Données de catalogage avant publication (Canada)

Humphrey, B.

Sort et persistance du pétrole brut échoué : survol
sur neuf années du projet BIOS, île de Baffin (T.N.-O),
Canada

(Rapport ; SPE 3/SP/4)
Publ. aussi en anglais sous le titre: The fate and
persistence of stranded crude oil.
Comprend un résumé en anglais.
Publ. par Protection de l'environnement, Conservation
et Protection.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-97412-3
No. de cat. MAS En49-14/3-4F

1. Déversements de pétrole -- Aspect de l'environnement --
Territoires du Nord-Ouest -- Baffin, île de. I. Owens, E. H.
II. Sergy, Gary A. III. Canada. Direction générale de la
protection de l'environnement. IV. Titre. V. Titre:
Survol sur neuf années du projet BIOS, île de Baffin (T.N.-O.),
Canada. VI. Coll.: Rapport (Canada. Environnement Canada) ;
SPE 3/SP/4.

TD899.P4H8514 1992 363.73'82'097195 C92-099626-4

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
N° de cat. En 49-14/3-4F
ISBN 0-662-97412-3

Commentaires

Pour formuler des commentaires sur la teneur du présent rapport, s'adresser à :

Gary Sergy
Gestionnaire, Bureau régional de l'Ouest
Direction du développement technologique
Conservation et Protection
Environnement Canada
4999, 98^{e} avenue
Edmonton (Alberta)
T6B 2X3

This report is also available in English under the title *The Fate and Persistence of Stranded Crude Oil: A Nine-year Overview from the BIOS Project, Baffin Island, N.W.T., Canada.* Please contact :

Environmental Protection Publications
Technology Development Branch
Conservation and Protection
Environment Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0H3

Résumé

Le projet de déversement de pétrole à l'île de Baffin, ou projet BIOS (Baffin Island Oil Spill), *s'est déroulé entre 1980 et 1983 au cap Hatt, à l'extrémité nord de l'île de Baffin au Canada. Il consistait en des déversements expérimentaux de pétrole sur une plage arctique et des secteurs de l'arrière-plage. On a mis à l'essai diverses méthodes de nettoyage, mais certaines parcelles ont été laissées intactes et ont fait l'objet d'une surveillance régulière. Au terme du projet, il restait du pétrole sur un certain nombre de parcelles et sur la zone intertidale; ces lieux ont été surveillés périodiquement jusqu'en 1989. On a ainsi pu bâtir une base de données à long terme concernant les déversements de pétrole côtiers. Ces informations permettent de tirer certaines conclusions claires, malgré certaines lacunes apparentes.*

Les conditions et les lieux de l'opération visaient à reproduire un scénario de mazoutage relativement grave mais réel dans un climat essentiellement froid et sur une plage à faible énergie de la houle, recouverte de gravier et de galets reposant sur des sédiments plus fins et moins perméables.

Dans la zone intertidale, une quantité importante du pétrole superficiel a été éliminée par des processus naturels. Tout d'abord rapide, le rythme d'élimination a considérablement ralenti à mesure qu'était enlevé le pétrole «libre» inaltéré disponible. La superficie mazoutée équivalente (SME) ne représentait plus que 28 % de la superficie initiale après deux saisons (environ cinq mois) d'eaux libres, et 13 % après huit saisons. Après deux ans, la plus grande partie du pétrole résiduel avait formé un revêtement bitumineux dans la zone intertidale supérieure. Après huit ans, la forme du pétrole résiduel variait de relativement fraîche à fortement altérée.

Dans la zone intertidale, les concentrations de pétrole subsuperficiel mesurées à des endroits prédéterminés se sont avérées faibles. L'observation visuelle d'autres endroits sur la plage a révélé qu'une certaine quantité de pétrole subsuperficiel frais et mobile demeurait présente après huit années.

Les nombreux relevés effectués sur la zone intertidale mazoutée permettent de dégager un certain nombre d'indicateurs de tendances, dont la longueur mazoutée, la superficie mazoutée, le volume de pétrole et le volume des sédiments mazoutés. Le plus utile (et le plus économique) des indicateurs concernant l'évolution

de l'état des littoraux mazoutés est la superficie mazoutée équivalente (SME), qui combine le pourcentage mazouté et le pourcentage de la superficie couverte. Durant toute la durée du projet, on a procédé à quelque 2 000 mesures des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) à partir d'échantillons prélevés dans les parcelles et sur la plage. La variabilité des résultats, attribuable à des variations dans la teneur en hydrocarbures et la granulométrie des échantillons, était élevée même dans les parcelles bien contrôlées. Les mesures des HPT ne suffisent pas à décrire la plage, mais elles peuvent servir à décrire certaines de ses caractéristiques.

L'élimination naturelle du pétrole d'arrière-plage ne se produit que si le pétrole est frais et exposé à l'atmosphère en l'absence d'autres forces. Après la première année d'exposition, le contenu en pétrole des sédiments d'arrière-plage avait très peu changé. Le processus d'altération s'est également limité à la première année. Après dix ans, la plus grande partie du pétrole déversé demeure sur les parcelles laissées intactes. Le mélange du sol de l'arrière-plage au moyen d'un motoculteur a ralenti l'élimination du pétrole par évaporation en transformant le pétrole superficiel (qui peut s'altérer lentement) en pétrole subsuperficiel, qui devient en quelque sorte protégé contre l'altération.

Abstract

The Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project was conducted at Cape Hatt at the northern end of Baffin Island, Canada, from 1980 to 1983. The project included experimental oil spills on an arctic beach and associated backshore areas. Cleanup methods were tested, but some plots were left untouched and were monitored regularly. Oil remained on a number of plots and on the intertidal beach after the project ended and this was monitored periodically until 1989. This program provides a long-term data base for oil spilled upon a shoreline. Some definitive conclusions may be made from the data, although some deficiencies have become apparent.

The site and oil conditions typified a relatively severe but real spill scenario for a low wave energy beach and predominantly frozen climate, combined with a predominantly pebble-cobble beach surface underlain by finer and less permeable sediments.

In the intertidal zone, natural environmental processes removed significant quantities of the surface oil. The removal rate was rapid at first, but the rate of change slowed significantly as the available unweathered "free" oil was removed. After two open-water seasons (about five months of open water), the Equivalent Oiled Area(EA) was reduced to 28% of the original, and to 13% after eight open-water seasons. After two years, most of the residual oil was bound in an asphalt pavement formation in the upper intertidal zone. After eight years, the residual oil varied from relatively fresh to a highly weathered form.

In the intertidal zone, subsurface oil concentrations determined at set locations were found to be low. Visual observations at other locations on the beach indicated some fresh and mobile subsurface oil was still present after eight years.

After many surveys of the oiled intertidal beach, a number of trend indicators were determined, including oiled length, oiled area, oil volume and oiled sediment volume. The most useful (and cost-effective) of the trend indicators for changes in the condition of oiled shorelines was Equivalent Oiled Area (EA), a method that combines percent covered with percent coverage. Over the entire project, approximately 2 000 Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) determinations were made on samples from these plots and the beach. The variability of the results, caused by variations in oil content and grain size in the samples, was high even on well

controlled plots. Total Petroleum Hydrocarbon determinations alone do not describe the beach, but they may be used to describe specific beach features.

Natural removal of backshore oil occurs only when the oil is fresh and exposed to the air if no other forces are applied. After the first year of exposure, very little change was observed in the oil content of backshore sediments. Weathering was also limited to the first year. After ten years, most of the spilled oil remains on the untouched plots. Mixing the spilled oil into the backshore using a rototiller resulted in reduced loss of oil to evaporative processes. The tilling had the effect of making surface oil, which can be slowly weathered, into subsurface oil, which is somewhat protected from weathering.

Table des matières

Résumé v
Abstract vii
Liste des tableaux xi
Liste des figures xii
Liste des planches xiii
Remerciements xiv

Section 1
Introduction 1
1.1 Contexte 1
1.2 Publications concernant le projet BIOS 1

Section 2
Zone d'étude 5
2.1 La région du cap Hatt 5
2.1.1 La lagune Z 5
2.1.2 La baie 11 6

Section 3
Méthodes 7
3.1 Application ou déversement du pétrole 7
3.1.1 Parcelles d'arrière-plage de la lagune Z 7
3.1.2 Déversement péricôtier dans la baie 11 7
3.2 Observations et mesures sur place 8
3.3 Échantillonnage 9
3.3.1 Parcelles de l'arrière-plage 9
3.3.2 Plage intertidale de la baie 11 9
3.4 Analyse des échantillons 9
3.4.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) 9
3.4.2 Chromatographie en phase gazeuse 10
3.5 Ratios d'altération 10
3.6 Calcul du bilan pétrolier superficiel dans la zone intertidale de la baie 11 11
3.6.1 Volume du pétrole superficiel 11
3.6.2 Volume des sédiments contaminés 11
3.7 Analyse statistique des résultats 11

Section 4
Résultats des analyses faites en 1980 dans les parcelles témoins d'arrière-plage 18
4.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) 18

4.2 Ratios d'altération **18**
4.3 Conclusion **19**

Section 5
Résultats des expériences faites en 1982 dans les parcelles d'arrière-plage **22**
5.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) **22**
5.2 Ratios d'altération **22**
5.3 Conclusion **22**

Section 6
Résultats concernant la plage intertidale de la baie 11 . . . **27**
6.1 Répartition du pétrole superficiel **27**
6.2 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) **27**
6.3 Volume du pétrole **35**
6.4 Ratios d'altération **35**
6.5 Revêtement bitumineux **35**
6.6 Échantillons divers **35**
6.7 Conclusion **37**
6.7.1 Couverture mazoutée superficielle **37**
6.7.2 Pétrole subsuperficiel **39**

Section 7
Conclusions **40**

Références **43**

Liste des tableaux

1	Rapports sur les programmes côtiers	3
2	Ratios d'altération diagnostiques	10
3	HPT (%) - Échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980	19
4	Analyse de régression des échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980	21
5	Ratios d'altération - Échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980	21
6	HPT (%), surface - Expériences d'arrière-plage, 1982	23
7	HPT (%), subsurface - Expériences d'arrière-plage, 1982	24
8	Ratios d'altération des échantillons superficiels - Expériences d'arrière-plage, 1982	24
9	Ratios d'altération des échantillons subsuperficiels - Expériences d'arrière-plage, 1982	26
10	Analyse de régression - Expériences d'arrière-plage, 1982	26
11	Répartition du pétrole superficiel	33
12	Changements concernant l'estimation du contenu en pétrole de la plage	33
13	Teneurs moyennes (%) de HPT en surface dans la zone intertidale de la baie 11	33
14	Teneurs moyennes (%) de HPT en subsurface dans la zone intertidale de la baie 11	34
15	Teneurs en HPT (%) des échantillons spéciaux - Baie 11	34
16	HPT (%) et volume calculé du pétrole - Baie 11	36
17	Indices d'altération moyens - Baie 11	36
18	Sommaire des changements - Baie 11	37

Liste des figures

1	Zone d'étude du cap Hatt et de la lagune Z	**2**
2	Emplacement des parcelles dans la lagune Z et la baie 11	**6**
3	HPT (%) - Parcelles témoins d'arrière-plage, 1980 . .	**20**
4	HPT (%) - Parcelles témoins d'arrière-plage, 1982 . .	**25**
5	Couverture mazoutée superficielle, zone intertidale de la baie 11	**28**
6	Teneurs en HPT (%), zone intertidale de la baie 11 - Strates	**31**
7	Teneurs en HPT (%), zone intertidale de la baie 11 - Transects	**32**
8	Changements du pétrole superficiel le long du littoral - Baie 11	**38**

Liste des planches

Planche 1

a) Parcelles témoins d'arrière-plage T1 (à droite) et T2 (à gauche) en 1981, une année après le mazoutage **13**

b) Parcelles d'arrière-plage en 1989 : vue de la surface . **13**

c) Parcelles d'arrière-plage en 1989 : pétrole visible dans les sédiments subsuperficiels (plus sombres) . . . **14**

Planche 2

a) Vue aérienne de la baie 11 : pétrole échoué sur le littoral en 1981 . . . . . **15**

b) Baie 11 : couverture mazoutée initiale en surface en 1981 . . . . . **15**

Planche 3

a) Baie 11 : vue aérienne en 1989 . . . . . **16**

b) Baie 11 : revêtement bitumineux dans la zone intertidale supérieure en 1989 . . . . . **16**

Planche 4

a) Baie 11 : matrice revêtement bitumineux/galets/sable en 1989 . . . . . **17**

b) Chatoiement d'hydrocarbures dans une fosse creusée dans la zone intertidale de la baie 11 en 1989 . . . . . **17**

Remerciements

Ce projet a été financé par la Direction du développement technologique du Bureau régional de l'Ouest (Environnement Canada), à Edmonton, dans le cadre du programme de recherche-développement sur les éco-urgences du Centre de technologie environnementale de River Road, à Ottawa.

Introduction

1.1 Contexte

Entre mai 1980 et août 1983, dans le cadre du projet de déversement de pétrole à l'île de Baffin (ou projet BIOS, d'après *Baffin Island Oil Spill*), des recherches ont été menées sur divers moyens d'intervention à envisager en cas de déversement d'une nappe de pétrole menaçant ou contaminant des régions côtières en milieu éloigné. Ces travaux se sont déroulés au cap Hatt, sur l'île de Baffin, dans l'Arctique canadien (*cf.* figure 1). On a surveillé un certain nombre de déversements expérimentaux pour évaluer quantitativement et comparer le sort et les effets de pétrole brut chimiquement dispersé ainsi que d'une nappe de pétrole brut échouée, et pour jauger l'efficacité de diverses techniques de décontamination du littoral.

Au terme du projet BIOS, il demeurait du pétrole résiduel sur de petites parcelles d'arrière-plage (dans la lagune Z) et sur une plus grande plage intertidale abritée (appelée «baie 11»). On y a fait une surveillance continue et à long terme du sort et de la persistance du pétrole échoué. Les études de suivi ont été financées par le Fonds pour l'étude de l'environnement en 1985, et par Environnement Canada en 1985, 1987 et 1989. Des relevés faisant appel à des techniques uniformes ont ainsi été effectués en 1980, 1981, 1982, 1983, 1985, 1987 et 1989.

1.2 Publications concernant le projet BIOS

Les résultats du projet BIOS, un programme de recherche multidisciplinaire quadriennal, ont été publiés dans une série de 24 rapports scientifiques faisant partie d'un numéro supplémentaire de la revue *Arctic* (volume 40, supplément 1, 1987), où l'on trouve également une description générale du projet (Sergy et Blackall, 1987).

Une expérience menée en 1981 a consisté à déverser à la surface de l'eau, près du rivage, 15 m^3 de pétrole brut vieilli, que l'on a laissé s'échouer sur une plage à faible énergie de la houle composée de sédiments mixtes. On a ensuite laissé opérer les processus d'assainissement naturels. On a surveillé le sort et la persistance du pétrole, du point de vue des concentrations et des changements de composition, dans quatre milieux principaux : la colonne d'eau (Humphrey *et al.*, 1987b); les sédiments de la plage intertidale (Owens *et al.*, 1987a, 1987b); les sédiments subtidaux (Boehm *et al.*, 1987); et les tissus de certains invertébrés benthiques (Humphrey *et al.*, 1987a). La biodégradation du pétrole a été étudiée dans les sédiments intertidaux (Eimhjellen et Josefson, 1984) et subtidaux (Bunch et Cartier, 1984). La migration du pétrole entre la plage et les sédiments subtidaux est examinée par Owens *et al.*, 1987c; les effets du pétrole sur les communautés subtidales, par Boehm *et al.*, 1987; et les effets sur le benthos, par Cross et Thompson, 1987, ainsi que par Cross *et al.*, 1987a et 1987b.

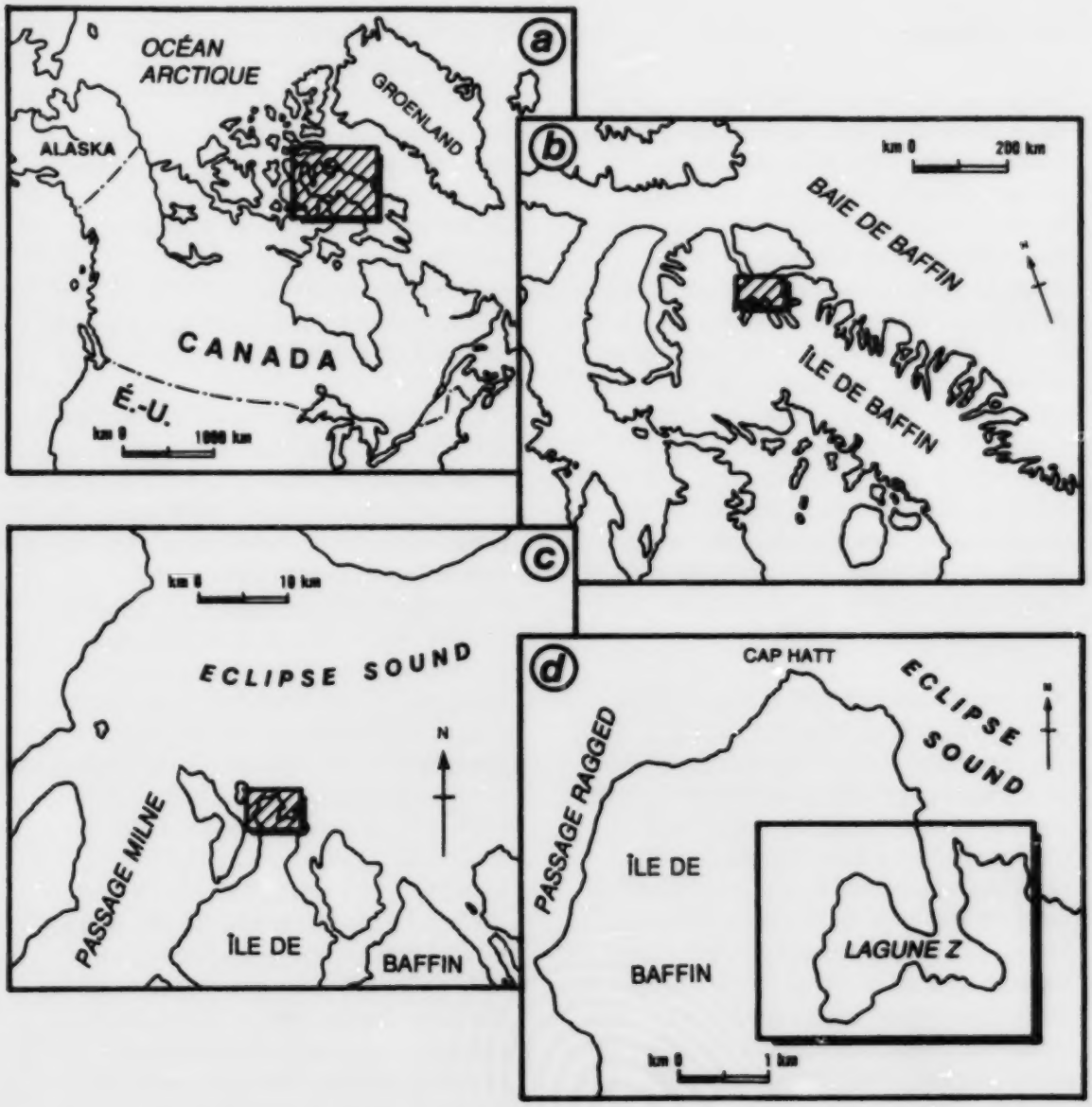


Figure 1 **Zone d'étude du cap Hatt et de la lagune Z**

Dans une autre expérience, on a établi en 1980 des parcelles témoins en trois endroits de la zone intertidale et de l'arrière-plage, et on y a expérimenté en 1981 et 1982 diverses techniques d'intervention côtière pour évaluer ces techniques et surveiller le sort du pétrole échoué (Owens et Robson, 1987b; Owens *et al.*, 1987d).

Les programmes d'étude du milieu côtier associés au projet BIOS ont démarré en 1980 et se sont poursuivis jusqu'en 1989, sur trois volets : sort et persistance du pétrole échoué dans la zone intertidale; sort et persistance du pétrole échoué sur l'arrière-plage immédiate (où il aurait pu être poussé par une onde de tempête); et efficacité des mesures de décontamination. Au début, on s'est concentré sur l'efficacité des mesures de décontamination ainsi que sur l'étude du sort et de la persistance du pétrole. On a cessé les expériences d'intervention en 1982 mais on a poursuivi la surveillance. En 1989, il restait du pétrole en trois endroits : les parcelles témoins d'arrière-plage à «Crude Oil Point» dans la lagune Z; les parcelles servant aux expériences d'arrière-plage à la baie 106; et la plage de la baie 11. Toutes ces études ont généré une foison de rapports et de publications.

Outre les publications officielles du projet BIOS citées dans la présente section, il existe toute une série de documents de travail dont beaucoup présentent des données originales. On en trouvera une liste au tableau 1.

En août 1989, une étude sur place a permis de prélever de nouveaux échantillons et de faire de nouveaux relevés sur : *a)* les parcelles mazoutées témoins et expérimentales des deux sites de la lagune Z; et *b)* la plage mazoutée de la baie 11, dans le passage Ragged. On a effectué des observations, fait des mesures et réalisé un échantillonnage systématique des sédiments contaminés, pour disposer d'une série de données que l'on pourrait comparer à celles des études précédentes. Par la suite, on a fait l'analyse chimique des échantillons pour en déterminer la teneur en hydrocarbures

Tableau 1 Rapports sur les programmes côtiers

Sujet	Année de l'étude	Rapport
Études côtières	1980	Woodward-Clyde Consultants, 1981
	1981	Owens *et al.*, 1982
	1982	Owens *et al.*, 1983
	1983	Owens, 1984a
	1985	Owens *et al.*, 1986a
	1987	Owens et Humphrey, 1988
Chimie	1980	Green, 1981; Boehm, 1981
	1981	Green *et al.*, 1982; Boehm *et al.*, 1982
	1982	Humphrey, 1983; Boehm, 1983
	1983	Humphrey, 1984; Boehm *et al.*, 1984
	1985	Owens *et al.*, 1986a
	1987	Owens et Humphrey, 1988

pétroliers totaux et pour évaluer le degré d'altération du pétrole. Dans le rapport que voici, nous présentons les résultats de cette étude faite en 1989 et nous brossons un tableau général du sort et de la persistance du pétrole brut échoué durant neuf ans sur l'arrière-plage et les zones de plages arctiques.

Les résultats des programmes de surveillance menés entre 1985 et 1989 ont été présentés au treizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (Humphrey *et al.*, 1990) et à la Conférence internationale de 1991 sur les déversements de pétrole (Sergy *et al.*, 1991; Humphrey *et al.*, 1991). Ces articles comparent les conclusions du programme de surveillance du projet BIOS et celles d'autres programmes analogues.

Environnement Canada dirige un programme général plus vaste visant la création d'une base de données sur le sort et la persistance du pétrole échoué. Dans le cadre de ce programme, des données pertinentes au projet BIOS ont été recueillies sur d'autres lieux mazoutés. Les rapports suivants analysent ces données ainsi que certains aspects particuliers du programme côtier.

i) *Amoco Cadiz* : Owens et Robson, 1985; Hope et Humphrey, 1986; Owens *et al.*, 1986a.

ii) *Metula* : Owens et Robson, 1987a; Owens *et al.*, 1987e.

iii) Estimations de la contamination du littoral par le pétrole : Owens, 1984a; 1987.

iv) Formation de revêtement bitumineux : Owens *et al.*, 1986b; 1987c.

Certains des résultats présentés dans ces rapports ont dû être réévalués au fur et à mesure que le projet avançait. Les rapports les plus récents devraient être considérés comme exacts.

Section 2

Zone d'étude

2.1 La région du cap Hatt

Le volet côtier du projet BIOS s'est déroulé sur plusieurs plages avoisinant le cap Hatt, dans le nord de l'île de Baffin, T.N.-O. (72° 31' N, 79° 50' O). Des parcelles ont été délimitées dans la zone intertidale en 1980, 1981 et 1982, ainsi que dans l'arrière-plage en 1980 et 1982, dans le secteur de la lagune Z, sur la côte est du cap Hatt, pour servir d'emplacements témoins et de lieux d'expérimentation de techniques de décontamination. Dans le cadre d'une autre étude, on a déversé à proximité du rivage du passage Ragged, en 1981, 15 m^3 de pétrole brut vieilli qu'on a laissé s'échouer sur une plage (appelée «baie 11») de la côte ouest de la péninsule du cap Hatt. Les figures 1 et 2 indiquent où sont situés ces emplacements.

La région du cap Hatt connaît des marées semi-diurnes et de hauteur inégale, variant entre 1,0 m pour les mortes-eaux et 2,0 m pour les vives-eaux (Buckley *et al.*, 1987). Il s'agit d'un environnement marin dominé par les glaces, où la saison estivale d'eaux libres dure en moyenne 63 jours par année (de la fin de juillet au début d'octobre), à l'intérieur d'une fourchette de 35 jours à 90 jours (Dickins, 1987). La zone intertidale est entourée par un pied de glace et est donc inactive durant la majeure partie de l'année du point de vue des processus environnementaux physiques (vent, vagues et marées). Les secteurs intertidaux sont biologiquement déserts, situation commune dans l'Arctique.

2.1.1 La lagune Z

Le secteur de la lagune Z est une grande baie de la côte est de la péninsule du cap Hatt, où a eu lieu une série diversifiée d'expériences côtières. En 1989, on a procédé à de nouveaux échantillonnages sur deux sites des plages de la lagune Z : i) les parcelles témoins d'arrière-plage mazoutées avec du pétrole vieilli et une émulsion (appelées T1 et T2 respectivement) que l'on avait délimitées en 1980 à «Crude Oil Point»; et ii) les parcelles d'arrière-plage mazoutées avec du pétrole vieilli (IMC) et une émulsion (IME) que l'on avait délimitées en 1982 comme zones témoins et zones d'évaluation des techniques de décontamination, à la baie 106 (*cf.* figure 2). En 1982, on avait mélangé le sol des parcelles d'évaluation des techniques de décontamination de la baie 106 au moyen d'un motoculteur, pour déterminer si cela modifierait le rythme et le degré d'altération du pétrole.

Les parcelles de Crude Oil Point sont situées sur une pente douce (moins de 5°), à environ 0,5 m au-dessus de la limite d'activité des vagues. Elles n'ont pas subi l'action des processus marins et offrent donc un site témoin de milieu non marin pour les données intertidales. Chaque parcelle mesure 40 m^2, dans un lieu caractérisé par des sédiments sablonneux et graveleux et un mince dépôt résiduel de galets.

Quant aux parcelles de la baie 106, on les a établies au-dessus de la berme de plage mais sous la limite supérieure d'action des processus marins, pour reproduire un scénario d'échouement de pétrole dans un lieu bien abrité durant les vives-eaux ou une

onde de tempête. L'effet des processus marins ne pourrait donc s'y faire sentir que lors de tels événements, peu fréquents. Le fetch maximum de la baie 106 dans la lagune Z est de l'ordre de 1 500 m; en conséquence, les parcelles ne seraient touchées que par les petites vagues produites durant la courte saison d'eaux libres dans cet environnement très abrité. Les sédiments de la berme sont du gravier et des pierres qui se transforment en sable fin dans l'arrière-plage.

2.1.2 La baie 11

La baie 11 est une petite plage située sur la rive est du fjord du passage Ragged (*cf.* figure 2). Elle possède un fetch inférieur à 10 km et est sujette à des vagues de faible énergie (hauteurs habituellement inférieures à 10 cm) durant la saison d'eaux libres. Il n'y a pas de données à long terme sur les vents, mais des observations révèlent que les vents dominants durant la saison d'eaux libres proviennent du quadrant nord-ouest (Meeres, 1987). La plage est abritée au nord et ouverte aux vagues sur un arc de 60° entre le sud-ouest et l'ouest-nord-ouest, ainsi qu'aux vagues réfractées du nord-ouest.

Durant les huit années de l'étude (août 1981 à août 1989), la plage aurait été libre de glaces (et par conséquent exposée aux processus physiques littoraux) durant environ 17 mois. La plage est délimitée par deux affleurements rocheux distants d'environ 400 m, et la largeur intertidale varie jusqu'à un maximum de 50 m. La zone intertidale inférieure est caractérisée par une crête graveleuse et pierreuse (embryon d'une barricade rocheuse) qui cède la place, du côté de la terre, à une petite dépression limoneuse et sablonneuse. La zone intertidale supérieure possède un estran de sable et de gravier, avec une faible berme pierreuse à la laisse de haute mer. Le fond marin péricôtier a une pente d'environ 4° et les sédiments fins et mal triés ont une granulométrie moyenne de 3,4 ϕ (environ 0,075 mm).

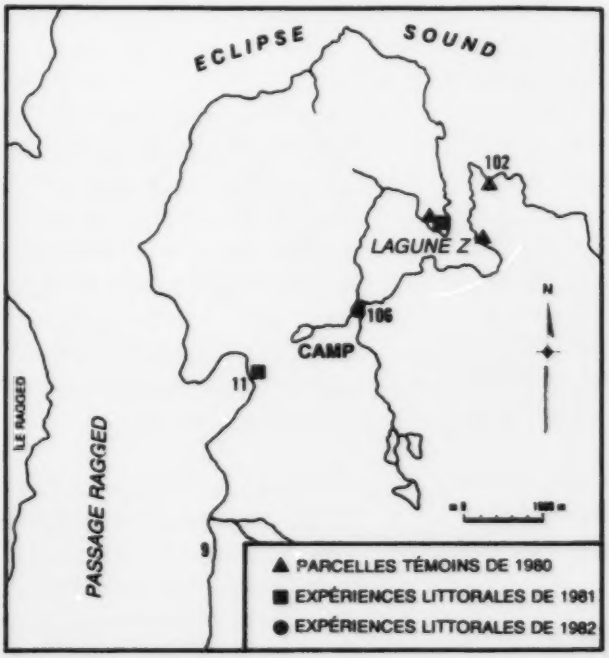


Figure 2 Emplacement des parcelles dans la lagune Z et la baie 11

Section 3

Méthodes

3.1 Application ou déversement du pétrole

3.1.1 Parcelles d'arrière-plage de la lagune Z

Deux formes du même pétrole ont été employées durant tout le programme d'étude : un pétrole brut Lagomedio artificiellement vieilli (8 % en poids) (Dickins *et al.*, 1987) et une émulsion de 50 % d'eau dans du pétrole brut vieilli. On a préparé l'émulsion sur place, en faisant circuler dans une pompe et un réservoir un mélange composé de deux barils d'eau de mer et de deux barils de pétrole brut vieilli, jusqu'à obtention de l'émulsion désirée. Chaque lot de quatre barils d'émulsion a été étiqueté et, pour réduire le nombre de variables, chaque parcelle n'a été mazoutée qu'avec du pétrole appartenant au même lot.

Avant l'application, on a prélevé un échantillon de chaque lot de pétrole brut et d'émulsion pour en faire une analyse par chromatographie en phase gazeuse (CG). L'émulsion est demeurée stable pendant un certain nombre de jours. En 1983, on a tenté d'émulsifier à nouveau deux barils d'émulsion préparés l'année précédente et dont le contenu s'était fractionné; malgré un brassage intensif, on n'a pu y arriver.

Chaque parcelle a été recouverte d'une couche relativement uniforme de 1 cm de pétrole brut vieilli et de 2 cm d'émulsion eau-pétrole, afin de simuler le déversement et l'échouement ultérieur d'une grande nappe de pétrole. Avant l'application, une rigole munie d'un revêtement intérieur a été creusée à la base de chaque parcelle, pour recueillir le pétrole qui s'écoulerait par gravité. On a également placé des tapis de plastique à l'extrémité de chaque parcelle, pour prévenir toute contamination à l'extérieur de la superficie prévue.

Le système d'application consistait en un baril de pétrole installé sur un véhicule tout-terrain (VTT) et relié par des boyaux et une pompe à un distributeur monté à l'arrière du VTT. Le pétrole était réparti sur une bande de 2 m à l'arrière du VTT à mesure que celui-ci traversait la parcelle. La vitesse du VTT était déterminée par le débit (3,1 L/s) nécessaire à l'épandage d'une épaisseur de 1 cm de pétrole brut et de 2 cm d'émulsion sur toute la parcelle (Woodward-Clyde Consultants, 1981; Owens *et al.*, 1982).

3.1.2 Déversement péricôtier dans la baie 11

Le 19 août 1981, quelque 15 m^3 de pétrole brut Lagomedio artificiellement vieilli (8 % en poids) ont été déversés sur l'eau près du littoral de la baie 11 (Dickins *et al.*, 1987). La période du déversement (15 h 40 à 21 h 40) correspondait au jusant. La nappe de pétrole ainsi créée a été poussée vers le littoral par une brise de mer dominante, et confinée au moyen d'une estacade fixée aux extrémités nord et sud de la baie.

Au terme de la période de déversement (marée basse), on a employé des écrémeuses et des sorbants pour éliminer le pétrole qui ne s'était pas échoué sur la plage. Cette opération s'est poursuivie de la soirée du 19 août jusqu'à 16 h le 21 août, moment où l'on a décidé que la quantité de pétrole refluant du littoral était insuffisante pour

qu'on poursuive les opérations. Quatre cycles des marées s'étaient alors écoulés. En tout, 58 barils de pétrole et d'émulsion eau-pétrole, soit environ 5,5 m^3 de pétrole, ont été récupérés de la surface de l'eau. La perte par dissolution durant le déversement est estimée à 0,26 m^3, la perte par évaporation durant le déversement à 1,95 m^3, et la perte par évaporation dans les 48 heures suivantes à 0,45 m^3 (Dickins *et al.*, 1987). On peut en déduire qu'environ 6,8 m^3 de pétrole ont contaminé la plage adjacente.

3.2 Observations et mesures sur place

Des relevés *in situ* ont été effectués dans le secteur de la lagune Z en juillet-août 1980, et dans les secteurs de la lagune Z et de la baie 11 en juillet-août 1981, août 1982, août 1983, août 1985, août 1987 et août 1989. On a observé visuellement le pétrole superficiel et subsuperficiel ainsi que les perturbations environnementales extérieures, par exemple l'érosion ou l'enfouissement de pétrole résultant de l'action des vagues ou des glaces. Des diapositives couleur des parcelles et des zones intertidales ont été prises lors de chaque relevé, et chaque année, sauf en 1987, on a pris des photographies aériennes couleur depuis un hélicoptère (*cf.* planches 1 à 4).

La distribution du pétrole superficiel dans la zone intertidale de la baie 11 a été relevée le long d'une série de 19 transects perpendiculaires au littoral et distants de 20 m. On avait démarqué les transects au moyen de pieux installés sur l'arrière-plage pour pouvoir procéder à des relevés répétitifs. On a fait des observations visuelles à intervalles de 2 m le long de chaque profil pour déterminer à 5 % près la couverture mazoutée; chaque observation représente donc 40 m^2.

À partir de ces données, on a groupé les observations en cinq grandes catégories : aucun pétrole visible, 0 %; couche légère, de 5 à 20 %; couche allant de légère à modérée, de 25 à 45 %; couche allant de modérée à épaisse, de 50 à 70 %; couche épaisse, de 75 à 100 %. Les distances le long des transects ont été mesurées au moyen d'un ruban en 1981 et 1982, et en nombre de pas en 1983, 1985 et 1987. En 1989, on a employé la méthode bipolaire d'Emery (1961). En 1983, une contre-vérification menée par deux observateurs impartiaux a chiffré à 5 % la répétabilité de cette technique (Owens, 1984b).

La longueur du littoral de la zone intertidale de la baie 11 où du pétrole est visible est déterminée à partir des données cartographiées. On obtient ainsi une mesure simple de l'étendue linéaire de la contamination. Les données groupées servent à mesurer la superficie et le degré de contamination.

La superficie mazoutée équivalente (SME), que l'on calcule en intégrant le pourcentage de couverture mazoutée à la superficie, offre une seconde description du degré de contamination littorale de la baie 11. Ainsi, un total de neuf observations (couvrant une superficie de 360 m^2) témoignant d'une couverture mazoutée de 10 % donnerait une SME de 36 m^2, et cinq observations (couvrant 200 m^2) de 80 % donneraient une SME de 160 m^2. Pour chaque série d'observations, on obtient la SME en additionnant les valeurs individuellement calculées obtenues en une fois. La couverture mazoutée superficielle moyenne du secteur contaminé de la plage de la baie 11 équivaut au quotient de la SME et de la superficie mazoutée totale.

Outre les mesures systématiques prises au sol à la baie 11, on a procédé chaque année à

une estimation visuelle de la couverture mazoutée totale de la plage, depuis un affleurement rocheux situé à l'extrémité nord de la plage, environ 5 m au-dessus de la laisse de haute mer. En 1983, 1985 et 1987, on a aussi visuellement estimé la couverture mazoutée de la plage à partir d'un hélicoptère volant à environ 100 m d'altitude (*cf.* planches 1 à 4).

3.3 Échantillonnage

Des échantillons de sédiments d'un volume maximal de 2,4 L, ou des sous-échantillons subséquemment composés pour former un volume de 2 à 2,5 L, ont été prélevés à la surface (de 0 à 2 cm de profondeur) et à la subsurface (de 5 à 10 cm de profondeur) des parcelles et de la plage intertidale. On a soumis tous les échantillons à un dosage des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT), pour déterminer la concentration de pétrole dans les sédiments, et on a analysé certains échantillons par chromatographie en phase gazeuse, pour établir leur composition.

3.3.1 Parcelles de l'arrière-plage

Avant l'opération de mazoutage, on avait établi pour chaque parcelle un plan d'échantillonnage quadrillé. L'échantillonnage ne s'est pas fait de la même façon d'une parcelle à l'autre et d'une année à l'autre, mais, à chaque échantillonnage, les spécimens étaient prélevés en un nouvel endroit de la parcelle. Des échantillons superficiels et subsuperficiels ont été prélevés dans les parcelles témoins d'arrière-plage (T1 et T2) de Crude Oil Point le jour même du déversement (20 août 1980), et ensuite après deux jours (22 août), quatre jours (24 août) et huit jours (28 août). Par la suite, il y a eu deux échantillonnages chaque année en 1981 et 1982, et un en 1983, 1985, 1987 et 1989.

Le 14 août 1982, soit une journée après le mazoutage, la première série d'échantillons superficiels et subsuperficiels a été prélevée à la baie 106, dans la berme et l'arrière-plage de chacune des parcelles couvertes de pétrole brut et d'émulsion (respectivement IMC et IME). Le 15 août, le sol de la moitié de chaque parcelle a été mélangé; par la suite, des échantillons ont été prélevés dans la berme et l'arrière-plage de chacune des sections non mélangées (IMC-T et IME-T) et mélangées (IMC-M et IME-M) plus tard la même journée, une semaine plus tard (le 22 août), un mois plus tard (le 15 septembre) et en une occasion en 1983, 1985, 1987 et 1989.

3.3.2 Plage intertidale de la baie 11

Il y a eu trois échantillonnages en 1981 (une journée, une semaine et trois semaines après le mazoutage), et un lors de chaque relevé en 1982, 1983, 1985, 1987 et 1989. Un échantillon superficiel et un échantillon subsuperficiel ont été recueillis le long de chacun de trois profils de plage en 1981, et le long de chacun de quatre profils en 1982, 1983, 1985, 1987 et 1989, dans les tiers inférieur, médian et supérieur de la zone intertidale. On souhaitait ainsi obtenir des données sur l'évolution de la teneur en hydrocarbures pétroliers totaux des sédiments. En 1983, 1985, 1987 et 1989, on a recueilli d'autres échantillons pour étudier certaines caractéristiques particulières, notamment le revêtement bitumineux qui s'était formé en 1983.

3.4 Analyse des échantillons

3.4.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT)

Pour l'analyse des hydrocarbures totaux par spectrophotométrie dans l'infrarouge, on a procédé à une extraction à l'aide d'un solvant (le Fréon 113) et on a ensuite mesuré l'absorption du CH_2 à 2 850 cm^{-1}. La limite

de détection était de 30 mg/kg, avec une précision de 10 mg/kg aux faibles concentrations et de 1 % aux concentrations élevées. L'exactitude de l'échantillonnage et la validité des résultats des analyses sont examinées par Humphrey (1984) et Owens et Robson (1987b).

3.4.2 Chromatographie en phase gazeuse

La méthode de Brown *et al.* (1979) a servi à l'extraction, au fractionnement et à l'analyse des échantillons. De 1980 à 1987, on a eu recours à la chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (CG-DIF) pour doser les n-alcanes et les isoprénoïdes, tandis que le couplage chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse (CG-SM) a servi à doser certains benzènes et hydrocarbures aromatiques polycycliques, alkylés et non alkylés. En 1989, on a analysé les deux fractions par CG-SM et on a produit des chromatogrammes ioniques reconstitués des fractions d'alcanes.

3.5 Ratios d'altération

Les données des analyses par chromatographie en phase gazeuse ont permis de calculer des ratios d'altération diagnostiques. Trois ratios diagnostiques ont servi à caractériser l'altération durant tout le programme : le ratio d'altération des hydrocarbures saturés (RAHS); le ratio alcanes/isoprénoïdes (ratio ALC/ISO); et le ratio d'altération des composés aromatiques (RACA) (*cf.* tableau 2). L'altération par évaporation est mesurée par le ratio d'altération des hydrocarbures saturés, qui approche de 1,0 à mesure que les hydrocarbures à faible point d'ébullition (de n-C_{10} à n-C_{17}) se volatilisent. La biodégradation est mesurée par le ratio alcanes/isoprénoïdes, qui approche de 0 à mesure que la concentration de n-alcanes subit une diminution préférentielle. Quant au RACA, il approche de 1,0 à mesure que les composés à faible point d'ébullition disparaissent par dissolution, évaporation ou les deux à la fois (Boehm *et al.*, 1987).

Tableau 2 Ratios d'altération diagnostiques

RATIO	DÉFINITION	LAGOMEDIO FRAIS	LAGOMEDIO VIEILLI
ALC/ISO	$\frac{\text{Somme (n-C}_{14}\text{-n-C}_{18})}{\text{(Farnésane, triméthyl-C}_{13}\text{, norpristane, pristane et phytane)}}$	2,4	2,5
RAHS	$\frac{\text{Somme (n-C}_{12}\text{ - n-C}_{25})}{\text{Somme (n-C}_{17}\text{ -n-C}_{25})}$	2,9	2,3
RACA	$\frac{\text{Tous les benzènes, naphtalènes, fluorènes, phénanthrènes et dibenzothiophènes (DBT)}}{\text{Phénanthrènes et DBT}}$	4,3	3,5

3.6 *Calcul du bilan pétrolier superficiel dans la zone intertidale de la baie 11*

3.6.1 Volume du pétrole superficiel

Deux méthodes ont été mises au point pour calculer le volume de pétrole superficiel sur la plage. La première mesure les changements de la répartition de la couverture pétrolière superficielle, et la deuxième repose sur les données relatives aux hydrocarbures totaux et à la superficie totale mazoutée.

La première méthode, la plus simple, consiste à établir un rapport entre le volume initial de pétrole échoué et les changements de la valeur de la SME. Un changement de la valeur de la SME d'une série de données à l'autre reflète un changement du volume de pétrole superficiel (de 0 à 2 cm) sur la plage. Selon cette méthode, si la valeur de la SME baisse de moitié entre deux relevés, on présume que le volume de pétrole superficiel a lui aussi diminué de moitié durant la même période. Cette méthode a pour données de base l'évaluation initiale (19 août 1981) du volume de pétrole superficiel, soit 5,3 m^3 (*cf.* paragraphe suivant), et la SME de 4 850 m^2 calculée lors du premier relevé (26 août 1981).

La deuxième méthode consiste à intégrer les concentrations d'hydrocarbures totaux et les données sur la répartition du pétrole. On multiplie la superficie totale de la plage mazoutée (8 570 m^2 en août 1981) par la profondeur d'échantillonnage (2 cm), ce qui donne 171,4 m^3 comme volume superficiel mazouté. Pour calculer le poids des matériaux superficiels de la plage jusqu'à une profondeur de 2 cm, on multiplie le volume par la densité présumée des sédiments de plage (1,6), ce qui donne 274 t ou 274 000 kg. En multipliant la teneur moyenne en pétrole (17 400 mg/kg le 19 août 1981) par le poids des sédiments (274 000 kg), on obtient un poids de 4 772 kg de pétrole sur la plage à cette date. Considérant une densité de 890 kg/m^3 pour le pétrole, on peut déterminer qu'il y avait 5,3 m^3 de pétrole sur la surface de la plage le 19 août 1981.

3.6.2 Volume des sédiments contaminés

On peut calculer un volume simple en multipliant la superficie totale d'une couverture mazoutée par la profondeur de la contamination. Cette valeur indique le volume total de sédiments mazoutés qu'il faudrait enlever et éliminer pour décontaminer la plage. Ainsi, en 1985, si l'on pose comme hypothèse que le pétrole a contaminé le sol à une profondeur moyenne de 10 cm, on obtient 440 m^3 comme volume des sédiments contaminés. Cette hypothèse (profondeur de 10 cm) repose sur le fait qu'on a trouvé très peu de pétrole dans les échantillons prélevés à une profondeur de 5 à 10 cm et qu'il s'agirait probablement là de la profondeur de travail de la machinerie employée durant une opération de décontamination.

Ce calcul doit toutefois être utilisé avec prudence, puisqu'il repose sur une hypothèse non vérifiée quant à la pénétration du pétrole.

3.7 *Analyse statistique des résultats*

Dans chaque cas, on a d'abord procédé à une analyse graphique des données sur les HPT. On a fait un graphique en fonction du temps (habituellement en nombre de jours suivant le mazoutage). Certaines tendances étaient apparentes, malgré une importante dispersion. La signification statistique des données a été évaluée au moyen d'une analyse complémentaire.

Avec l'accumulation de données de plusieurs années, nous avons jugé bon d'assujettir les séries chronologiques à une analyse de régression. On a analysé la régression des teneurs en HPT pour chaque parcelle et sous-parcelle ou profondeur par rapport au nombre de jours écoulés depuis le mazoutage, pour déterminer s'il en découlait des modifications statistiquement significatives.

a) **Parcelles témoins d'arrière-plage T1 (à droite) et T2 (à gauche) en 1981, une année après le mazoutage**

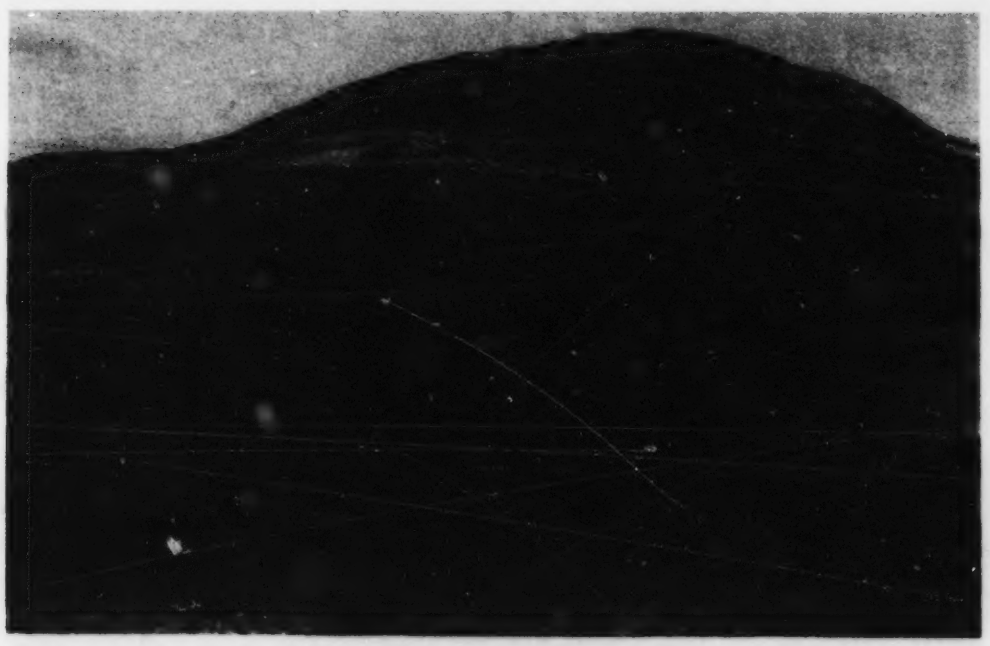
b) **Parcelles d'arrière-plage en 1989 : pétrole de la surface**

Planche 1

c) **Parcelles d'arrière-plage en 1989 : pétrole visible dans les sédiments subsuperficiels (plus sombres)**

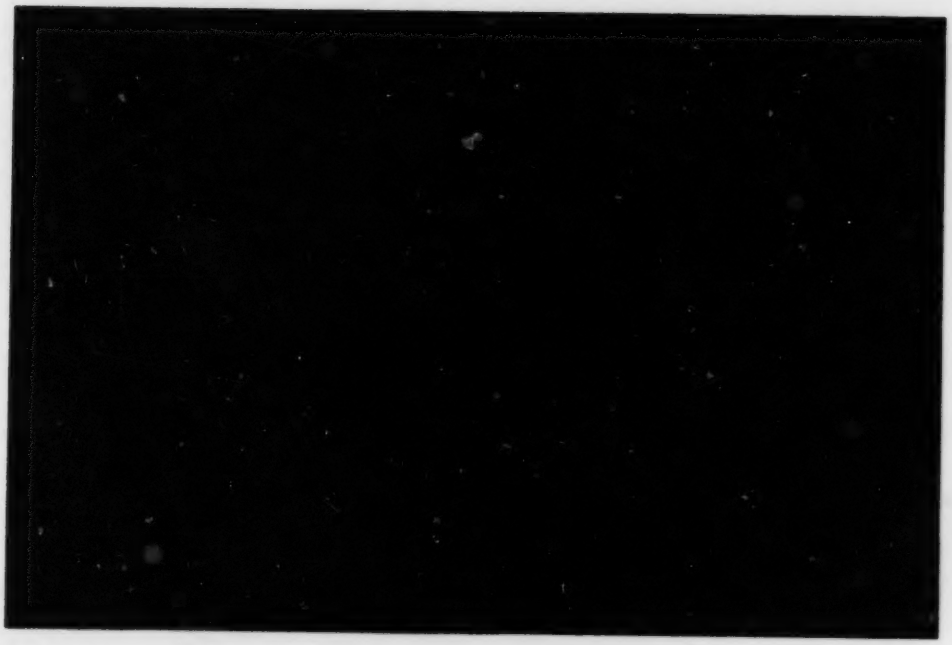
Planche 1 (suite)

a) **Vue aérienne de la baie 11 : pétrole échoué sur le littoral en 1981**

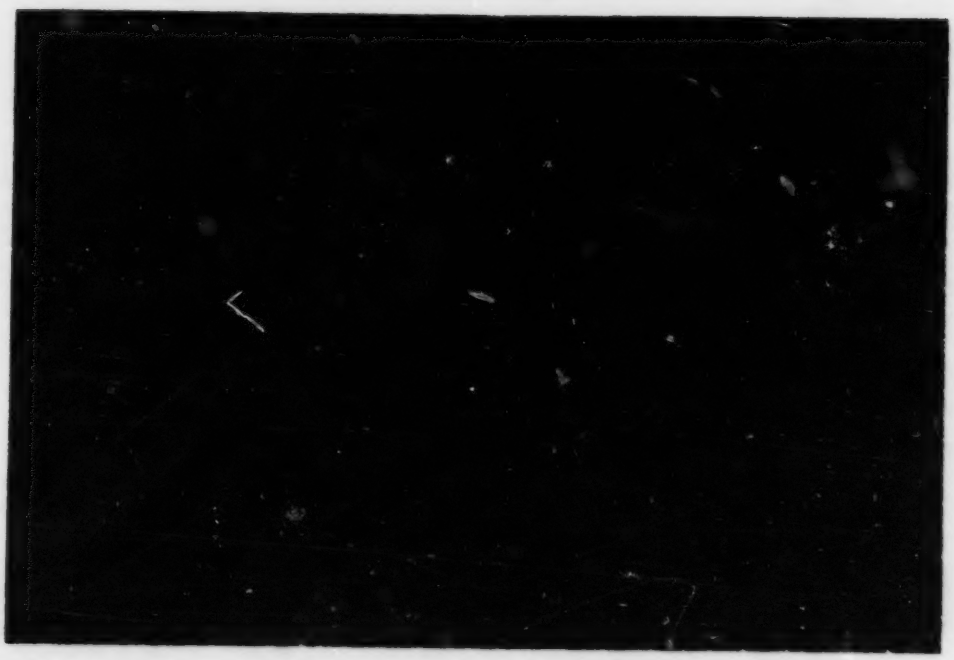


b) **Baie 11 : couverture mazoutée initiale en surface en 1981**

Planche 2



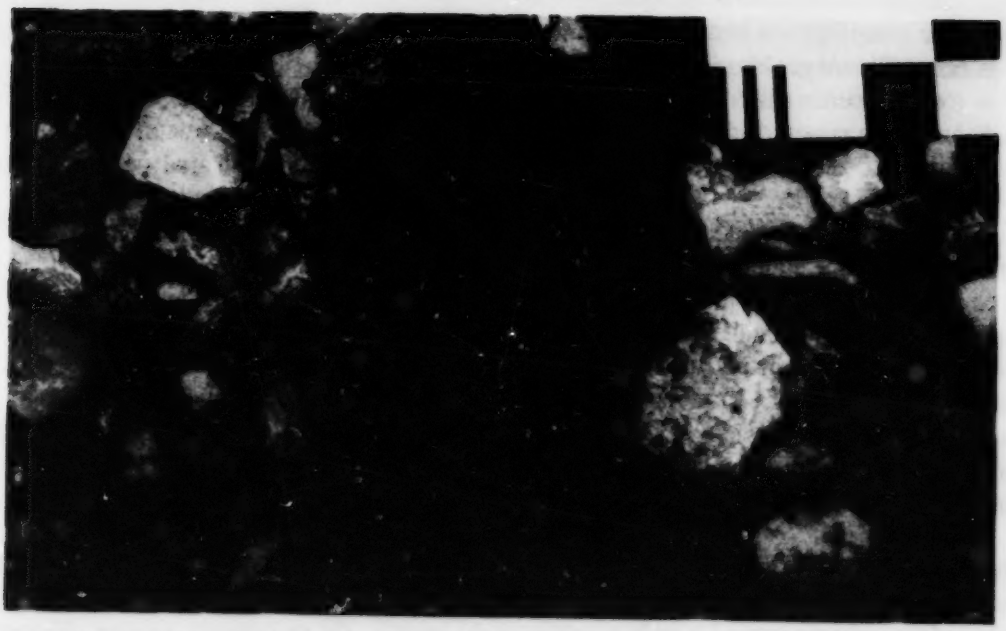
a) **Baie 11 : vue aérienne en 1989**



b) **Baie 11 : revêtement bitumineux dans la zone intertidale supérieure en 1989**

Planche 3

a) **Baie 11 : matrice revêtement bitumineux/galets/sable en 1989**



b) **Chatoiement d'hydrocarbures dans une fosse creusée dans la zone intertidale de la baie 11 en 1989**

Planche 4

Section 4

Résultats des analyses faites en 1980 dans les parcelles témoins d'arrière-plage

4.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT)

En 1987, le pétrole superficiel des deux parcelles était devenu gris foncé et avait acquis une apparence vieillie, mais, en 1989, le pétrole subsuperficiel avait conservé sa couleur noire et son apparence relativement fraîche. Dans la parcelle mazoutée avec du pétrole brut (T1), l'analyse de la teneur en hydrocarbures totaux des sédiments superficiels entre 1980 et 1989 révèle une réduction de la quantité de pétrole dans ces sédiments (*cf.* tableau 3), quoique la variance de l'échantillonnage soit trop élevée pour que les résultats soient statistiquement significatifs, comme l'indique la figure 3. La variance s'explique en bonne partie par le biais d'échantillonnage; les résultats de 1983 sont de toute évidence différents de ceux des autres années, en raison du faible nombre d'échantillons.

Les concentrations de pétrole dans les sédiments de surface étaient initialement beaucoup plus faibles dans la parcelle mazoutée avec l'émulsion (T2) que dans la parcelle mazoutée avec le pétrole brut, et elles sont demeurées dans le même intervalle entre 1980 et 1989 (*cf.* tableau 3). On ne constate aucune tendance évidente ou statistiquement valide.

Initialement (en 1980), les sédiments subsuperficiels provenant de la parcelle contaminée au pétrole brut (T1) présentaient une teneur en HPT inférieure de moitié à celle des sédiments superficiels (*cf.* tableau 3). Après la première année, les concentrations étaient stables bien que dispersées (*cf.* figure 3). Selon une analyse de régression, les concentrations n'ont pas changé de façon significative entre 1981 et 1989, mais sont demeurées dans le même intervalle de valeurs. Tout changement éventuel d'une année à l'autre est masqué par les écarts importants à l'intérieur des années (*cf.* tableau 4).

4.2 Ratios d'altération

Le tableau 5 indique les ratios d'altération pour les parcelles témoins d'arrière-plage, en 1980. On constate un fléchissement initial des RAHS pour les échantillons de sédiments superficiels provenant des deux parcelles, ce qui dénote une altération active par évaporation avant l'échantillonnage de 1981. Depuis, les valeurs sont demeurées relativement stables. Aucun échantillon subsuperficiel n'a été analysé en 1980, mais les résultats subséquents indiquent que l'altération par évaporation s'est avérée plus lente en subsurface qu'en surface. C'est particulièrement le cas de la parcelle mazoutée avec l'émulsion (T2), qui semble avoir relativement peu changé. (Remarque : le RAHS du lot original de pétrole brut vieilli livré dans la zone d'étude est de 2,28.)

Les ratios ALC/ISO des échantillons de sédiments superficiels et subsuperficiels prélevés dans les deux parcelles semblent avoir diminué lentement durant la période étudiée. On ne constate aucune différence évidente sur ce plan d'une parcelle à l'autre ou entre les sédiments superficiels et subsuperficiels.

D'après les quelques RACA mesurés, en 1985, les sédiments superficiels et subsuperficiels de T1 s'étaient altérés à un rythme similaire, tandis que les sédiments subsuperficiels de T2 s'étaient altérés beaucoup plus lentement que les sédiments superficiels des deux parcelles et les sédiments subsuperficiels de T1.

4.3 Conclusion

Malgré les fortes variances statistiques qui caractérisent les séries annuelles de données, nous avons conclu qu'à la fin du premier été, le pétrole avait pénétré le substrat sec et assez meuble. Après 1980, les concentrations superficielles et subsuperficielles de pétrole diffèrent peu. À cet endroit, le pétrole n'a jamais formé de croûte superficielle rigide ni pris l'apparence d'un revêtement bitumineux. Le contenu en pétrole a peu changé au fil des ans, abstraction faite d'une diminution initiale de la teneur en pétrole des sédiments superficiels de T1, en raison de l'altération des fractions légères du pétrole brut.

On pense aujourd'hui que les tendances qui étaient apparentes jusqu'en 1985 sont imputables au plan d'échantillonnage. En réalité, la teneur en pétrole des sédiments superficiels et subsuperficiels a changé très peu ou pas du tout après la première année d'exposition. En faisant une analyse de régression des teneurs en HPT par rapport au nombre de journées écoulées depuis le mazoutage, on constate très peu de changements dans toutes les parcelles, et ces faibles changements se sont tous produits au cours de la première année.

Comme l'indique le tableau 3, il y a eu un changement significatif sur l'ensemble de la période, soit de 1980 à 1989, mais ce changement ne s'est produit que durant la première année, après quoi il n'y a eu aucun changement mesurable. Dans tous les cas, les fortes variations intra-annuelles masquent tout éventuel changement interannuel. De toute évidence, le rythme de changement est très lent. Même si certains des premiers échantillons contenaient de fortes concentrations de pétrole, dans l'ensemble, les concentrations n'ont diminué que d'environ 0,2 % chaque année, ou de 1,5 à 2 % la première année et pas du tout ensuite.

Tableau 3 HPT (%) - Échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980

DATE	T1 (brut)		T2 (émulsion)	
	Surface	Subsurface	Surface	Subsurface
20 août 1980	4,0	2,3	1,3	1,5
22 août 1980	5,8	3,0	2,0	2,7
24 août 1980	3,4	3,5	1,3	1,3
28 août 1980	6,6	1,7	6,0	5,8
28 juillet 1981	2,8	2,4	1,4	2,1
29 août 1981	3,4	2,1	1,6	1,8
10 août 1982	2,8	1,6	1,7	1,7
2 sept. 1982	2,9	1,5	1,8	1,4
20 août 1983	0,9	1,0	2,3	0,6
11 août 1985	1,6	0,6	1,1	0,6
11 août 1987	2,7	1,7	2,6	1,6
16 août 1989	2,4	0,3	1,7	0,3

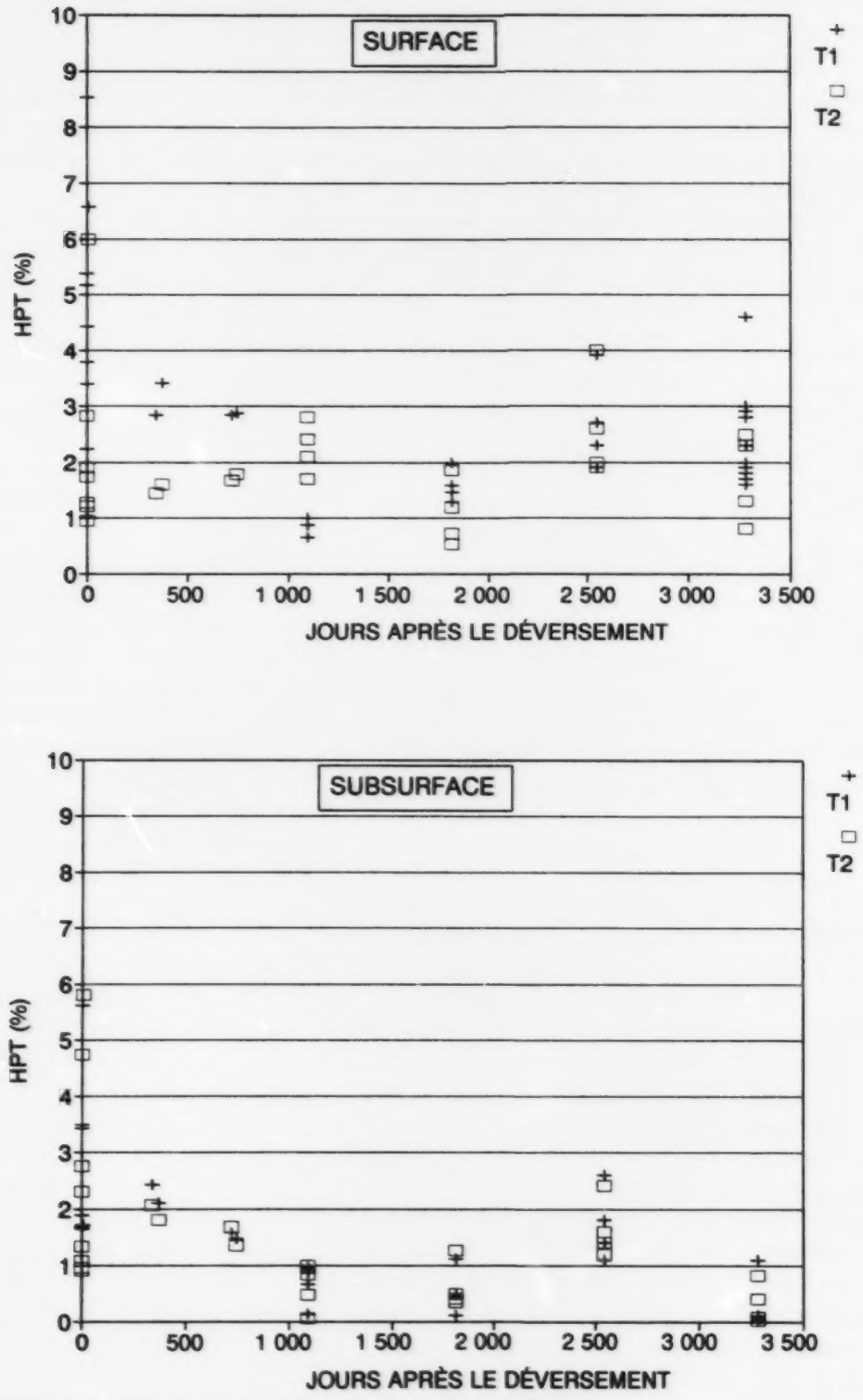


Figure 3 **HPT (%) - Parcelles témoins d'arrière-plage, 1980**

Tableau 4 Analyse de régression des échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980

	Taux de changement (% HPT par année)	
	1980 - 1989	1981 - 1989
T1 - Surface	0,2	<0,1
T2 - Surface	<0,1	<0,1
T1 - Subsurface	0,2	<0,1
T2 - Subsurface	0,2	<0,1

Tableau 5 Ratios d'altération - Échantillons des parcelles témoins d'arrière-plage, 1980

	T1 (brut)						T2 (émulsion)					
	Surface			Subsurface			Surface			Subsurface		
ANNÉE	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA
20 août 1980	2,2	2,6	3,5				2,1	2,6				
28 août 1980	2,2	2,8	3,1				2,1	2,6				
1981	1,6	2,1	2,0	1,7	2,5		1,6	2,4	3,1	2,0	2,6	
1982	1,6	2,4					1,3	2,4				
1983	1,1	1,9		1,8	2,2		1,4	2,2		2,2	2,2	
1985	1,6	2,0	1,8	1,9	2,1	1,9	1,1	1,8	1,3	2,2	2,3	2,7
1987	1,4	3,1	1,8	2,2	2,9	4,4	1,3	3,1	1,9	1,8	2,9	2,4
1989	1,4	1,8	5,1									

Section 5

Résultats des expériences faites en 1982 dans les parcelles d'arrière-plage

5.1 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT)

Les tableaux 6 et 7 indiquent les teneurs en HPT pour les expériences d'arrière-plage menées en 1982. Dans les parcelles témoins, on observe une baisse des concentrations du pétrole superficiel au fil du temps, tant pour le pétrole brut (IMC) que pour l'émulsion (IME), mais il n'y a aucun changement significatif pour ce qui est des échantillons provenant d'un sol mélangé ou de la subsurface. La figure 4 illustre graphiquement ces résultats. Le changement observé pour les échantillons superficiels des parcelles témoins est en grande partie attribuable à une diminution de la concentration des valeurs excentriques. Là aussi, comme l'indique la figure 4, la variabilité intra-annuelle a pour effet de masquer les changements interannuels ou les tendances subtiles à long terme.

5.2 Ratios d'altération

Les tableaux 8 et 9 indiquent les ratios d'altération des échantillons prélevés lors des expériences d'arrière-plage de 1982. Les RAHS des échantillons superficiels ne présentent aucune tendance majeure, hormis une réduction des ratios de toutes les parcelles après la série de données de 1982. En 1983, les échantillons subsuperficiels présentaient des ratios plus élevés que les échantillons superficiels correspondants, à une exception près (parcelle témoin IME, arrière-plage). Les ratios ont diminué entre 1983 et 1985 dans les parcelles mazoutées avec le pétrole brut, mais ils sont demeurés élevés dans les parcelles mazoutées avec l'émulsion. Le mélange du sol semble n'avoir eu aucun effet apparent sur le rythme d'altération par évaporation dans les périodes à court et à long terme couvertes par ces résultats.

Quant aux ratios ALC/ISO, ils ne révèlent aucune biodégradation importante, tant en surface qu'en subsurface. Les quelques RACA disponibles, obtenus principalement à partir des échantillons des parcelles témoins, montrent une certaine réduction en ce qui concerne la parcelle témoin mazoutée avec le pétrole brut, mais on n'observe qu'une tendance très faible ou nulle dans les échantillons provenant de la parcelle mazoutée avec l'émulsion. Le RACA perd sa signification dans les échantillons subséquents, puisqu'on peut obtenir des valeurs élevées lorsque les concentrations des composés individuels deviennent très faibles.

Les ratios d'altération des échantillons issus de ces parcelles sont similaires à ceux observés en 1980 dans les échantillons des parcelles d'arrière-plage. En résumé, il y avait des signes d'altération par évaporation après la première année d'exposition, mais peu de signes de tout autre type d'altération.

5.3 Conclusion

Dans les parcelles d'arrière-plage, le mélange du pétrole semble avoir ralenti son élimination. Dans les deux parcelles témoins, la quantité de pétrole a diminué plus rapidement que dans les parcelles où le

sol avait été mélangé, et les concentrations de pétrole subsuperficiel y sont restées stables. Les teneurs en HPT dans les parcelles témoins ont légèrement changé durant la première année seulement, tandis que dans les sols mélangés, les concentrations sont restées stables durant toute la durée de l'expérience (*cf.* tableau 10). Il semble que seule une exposition totale cause l'altération. Cette situation concorde avec ce qu'on a constaté dans les autres parcelles, c'est-à-dire que le pétrole subsuperficiel ne perd pas de sa concentration. Le mélange du sol augmente la superficie de la couverture mazoutée mais protège le pétrole contre les processus d'altération qui agissent en surface. En diminuant la concentration de pétrole superficiel, le mélange a pour effet net de ralentir l'élimination naturelle de ce type de pétrole dans l'arrière-plage. Avant de procéder au mélange pour exposer le pétrole subsuperficiel, il serait préférable d'attendre que le pétrole superficiel se soit dégradé ou ait été enlevé.

Tableau 6 HPT (%), surface - Expériences d'arrière-plage, 1982

	IMC				IME			
	Témoin		Mélangé		Témoin		Mélangé	
DATE	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage
14 août 1982*	11,0	2,4	5,7	2,4	1,2	1,8	1,7	4,2
15 août 1982	6,7	2,1	2,3	1,3	0,8	3,5	0,9	1,2
22 août 1982	8,9	3,8	1,9	1,5	0,9	4,0	1,4	2,5
15 sept. 1982	5,7	3,3	3,1	1,8	0,5	6,5	0,9	1,7
20 août 1983	6,2	2,2	3,1	1,1	1,1	1,4	0,7	1,1
10 août 1985	4,7	1,3	2,6	1,3	1,1	1,2	2,4	1,5
11 août 1987	1,9	2,4	1,3	1,0	0,7	1,7	0,9	1,1
16 août 1989	2,8	1,4	2,4	1,2	0,3	2,1	0,3	1,1

* Échantillons prélevés avant le mélange.

Tableau 7 HPT (%), subsurface - Expériences d'arrière-plage, 1982

	IMC				IME			
	Témoin		Mélangé		Témoin		Mélangé	
DATE	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage	Berme	Arrière-plage
14 août 1982*	0,2	0,0	0,7	0,0	1,5	0,0	1,8	0,0
15 août 1982	0,1	0,1	0,0	0,8	1,1	0,0	1,3	1,2
22 août 1982	0,2	0,0	2,7	0,9	0,1	0,0	0,8	1,5
15 sept. 1982	0,7	0,1	2,3	0,8	1,3	0,3	1,2	1,5
20 août 1983	0,1	0,0	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	0,6
10 août 1985	1,0	0,0	0,6	0,2	1,2	1,2	0,9	0,7
11 août 1987	2,0	0,1	1,4	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7
16 août 1989	0,5	0,2	0,4	0,1	0,4	0,4	0,8	0,1

* Échantillons prélevés avant le mélange.

Tableau 8 Ratios d'altération des échantillons superficiels - Expériences d'arrière-plage, 1982

	IMC						IME					
	Témoin			Mélangé			Témoin			Mélangé		
ANNÉE/ LIEU	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA
15 août 1982 / arrière-plage	2,0	2,6	2,8	2,6	2,5	S.O.	2,3	2,6	S.O.	2,3	2,6	2,4
22 août 1982/ berme	2,2	2,7	2,0	2,0	2,7	S.O.	2,0	2,6	S.O.	1,8	2,9	2,1
1983/ arrière-plage	1,4	1,9	1,7	1,7	2,2	S.O.	1,6	2,4	S.O.	1,5	1,4	1,8
1983/ berme	1,5	2,2	2,3	1,6	2,3	S.O.	1,7	2,3	S.O.	1,7	2,1	2,8
1985/ arrière-plage	1,6	1,7	1,5	1,8	2,0	3,0	1,6	2,4	2,3	1,6	2,3	2,6
1987/ arrière-plage	1,3	0,8	1,2	1,5	2,8	1,6	1,4	1,2	1,7	1,4	2,3	1,4
1989/ arrière-plage	1,6	1,8	6,4	1,5	1,7	6,2	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.

S.O. = sans objet.

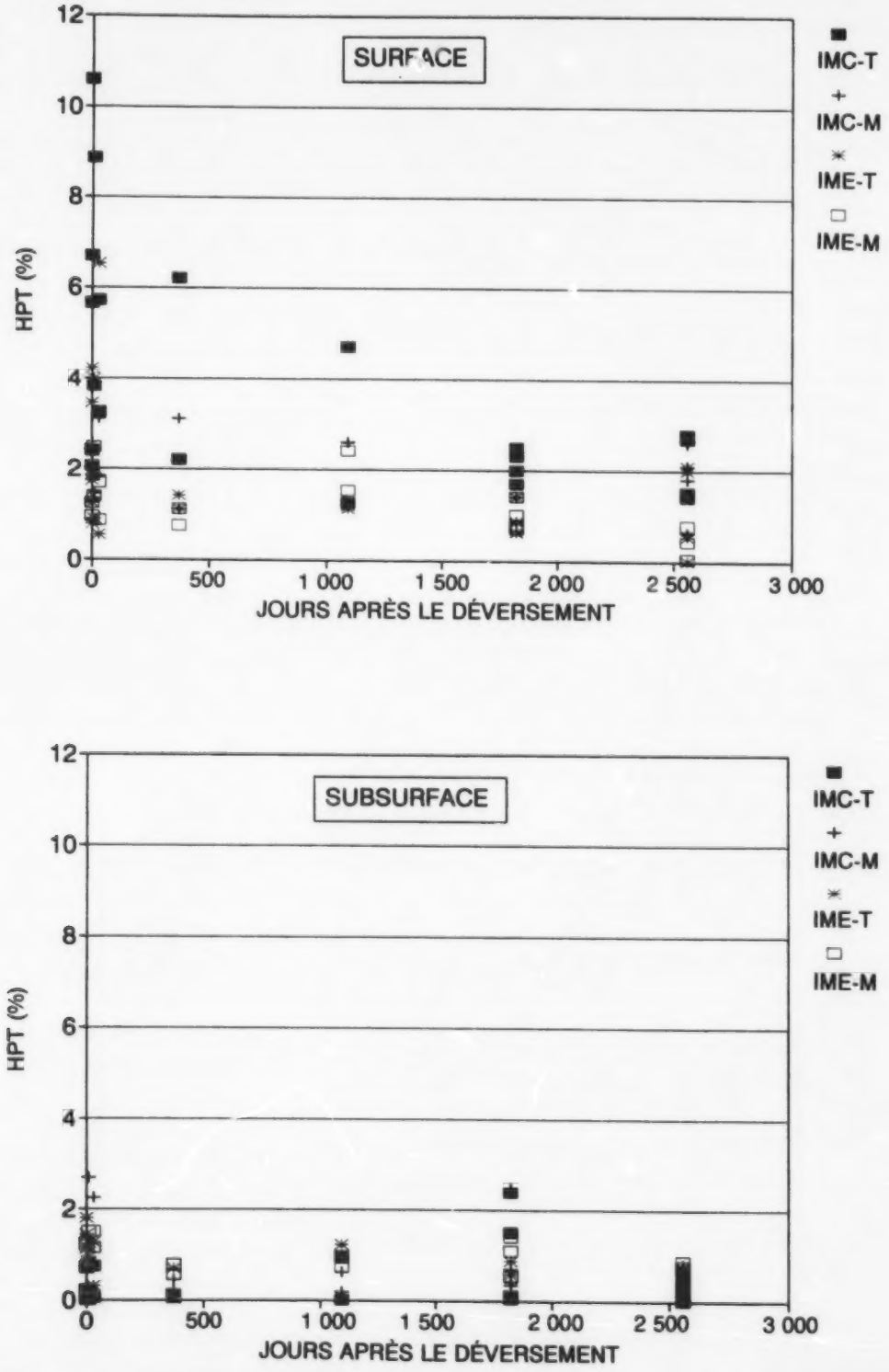


Figure 4 **HPT (%) - Parcelles témoins d'arrière-plage, 1982**

Tableau 9 Ratios d'altération des échantillons subsuperficiels - Expériences d'arrière-plage, 1982

ANNÉE/ LIEU	IMC						IME					
	Témoin			Mélangé			Témoin			Mélangé		
	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA	RAHS	ALC/ ISO	RACA
15 août 1982/ arrière-plage	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
22 août 1982/ berme	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
1983/ arrière-plage	1,9	2,1	3,1	2,0	2,1	S.O.	2,1	2,3	S.O.	1,6	2,0	S.O.
1983/ berme	2,4	2,3	S.O.	2,1	2,3	S.O.	2,0	2,2	S.O.	2,0	2,3	2,0
1985/ arrière-plage	1,5	1,5	1,9	1,8	2,0	2,3	2,3	2,4	3,8	2,3	2,4	3,7
1987/ arrière-plage	1,4	2,3	366	2,3	2,7	3,1	1,7	1,5	2,5	1,7	2,7	2,4
1989/ arrière-plage	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.

S.O. = sans objet.

Table 10 Analyse de régression - Expériences d'arrière-plage, 1982

	Taux de changement (% HPT par année)	
	Surface	Subsurface
IMC - Témoin	0,4	<0,1
IMC - Mélangé	<0,1	0,1
IME - Témoin	0,2	<0,1
IME - Mélangé	<0,1	<0,1

Section 6

Résultats concernant la plage intertidale de la baie 11

6.1 Répartition du pétrole superficiel

On a procédé chaque année, de façon systématique, à une observation visuelle de la couverture mazoutée en surface. Ces résultats ont servi à préparer une série de cartes illustrant la distribution du pétrole superficiel. La figure 5 indique les distributions observées à partir de la semaine qui a suivi le mazoutage jusqu'au mois d'août 1989.

Les observations visuelles ont également servi à déterminer la superficie totale de chaque catégorie de couverture. Entre 1981 et 1989, la superficie de la plage ayant une couverture mazoutée observable a chuté à moins de 20 % de la superficie initialement observée (*cf.* tableau 11). La valeur de la superficie mazoutée équivalente (SME), qui a chuté de 87 % durant la période étudiée, donne une idée du changement survenu concernant le degré ou l'envergure de la contamination (tableau 12).

6.2 Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT)

L'analyse des échantillons de sédiments superficiels recueillis à diverses reprises sur la plage intertidale révèle deux choses : premièrement, une diminution générale des teneurs moyennes en HPT au fil du temps et, deuxièmement, des teneurs habituellement plus élevées dans les échantillons des zones intertidales supérieure et médiane que dans ceux de la zone intertidale inférieure (*cf.* tableau 13). Quant aux sédiments subsuperficiels, l'analyse ne révèle aucune tendance spatiale ou temporelle; les valeurs obtenues sont généralement inférieures de dix à cent fois aux valeurs mesurées pour les sédiments superficiels, quoique cela ne s'applique pas universellement (*cf.* tableau 14).

Les teneurs en HPT des échantillons de sédiments présentaient une grande hétérogénéité. Les graphiques des concentrations de HPT tracés en fonction du temps selon chaque strate de plage illustrent la forte variabilité des résultats (*cf.* figure 6). Cette variance marquée force l'analyse de régression à n'indiquer aucun changement dans les concentrations au fil du temps. En traçant les résultats par transect perpendiculaire en fonction du temps (*cf.* figure 7), on peut déduire que le mazoutage initial n'était pas homogène et s'est avéré plus intense à l'extrémité sud de la plage (transect 6) et plus léger à l'extrémité nord (transect 2). Cette description ne correspond pas aux observations visuelles enregistrées sur les cartes de la couverture mazoutée superficielle.

On a également fait un échantillonnage spécial (subjectif) de sédiments pour illustrer les différences observées dans la couverture mazoutée superficielle qui correspondaient à des traits morphologiques de la plage. Selon ces données (*cf.* tableau 15), les plus fortes teneurs en HPT étaient associées au revêtement bitumineux de l'estran (valeurs pour les six échantillons de revêtement variant de 1,2 à 2,5 %), tandis qu'on remarque jusqu'en 1989 une importante concentration secondaire de valeurs élevées à la surface du revêtement se trouvant sur la crête de plage inférieure.

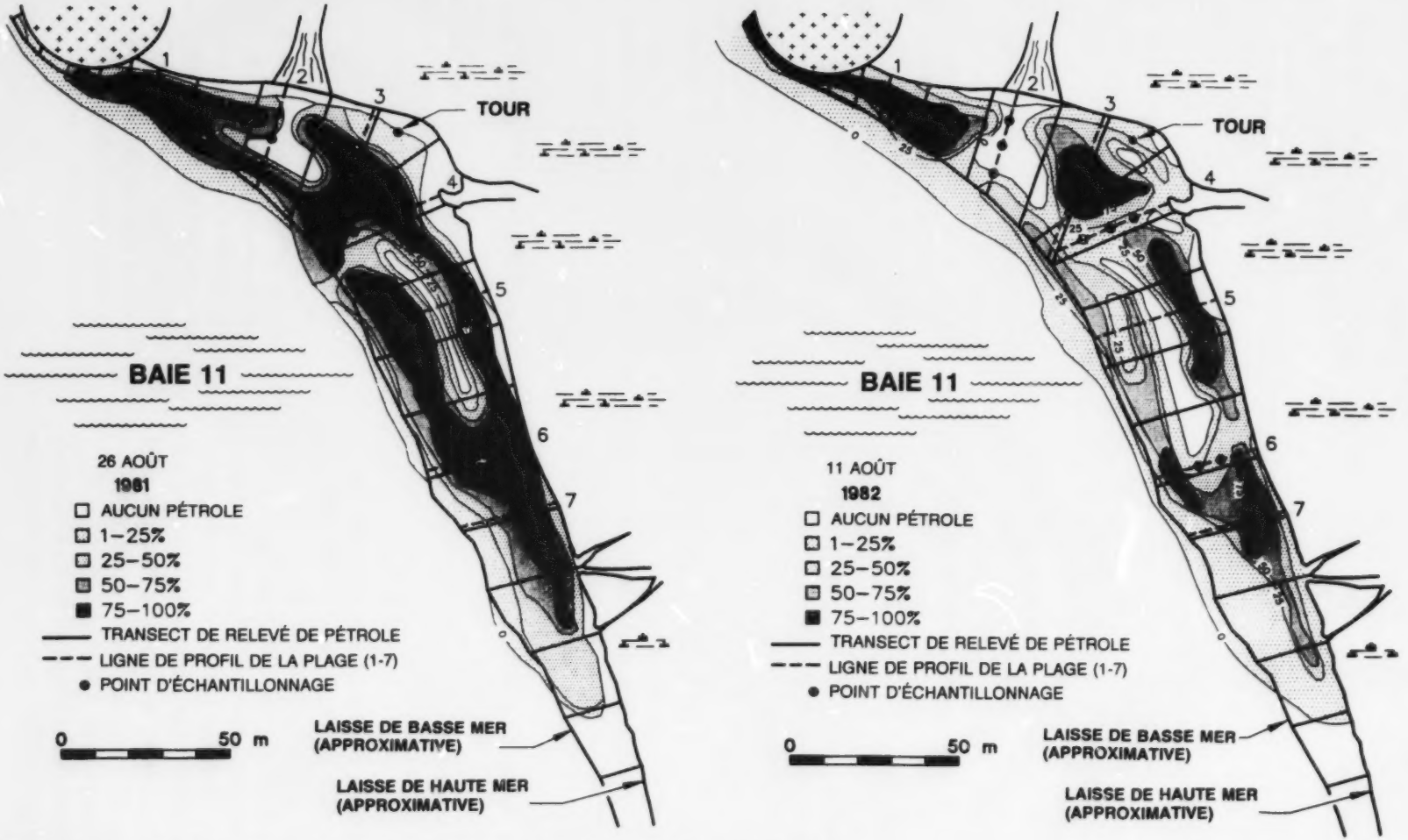
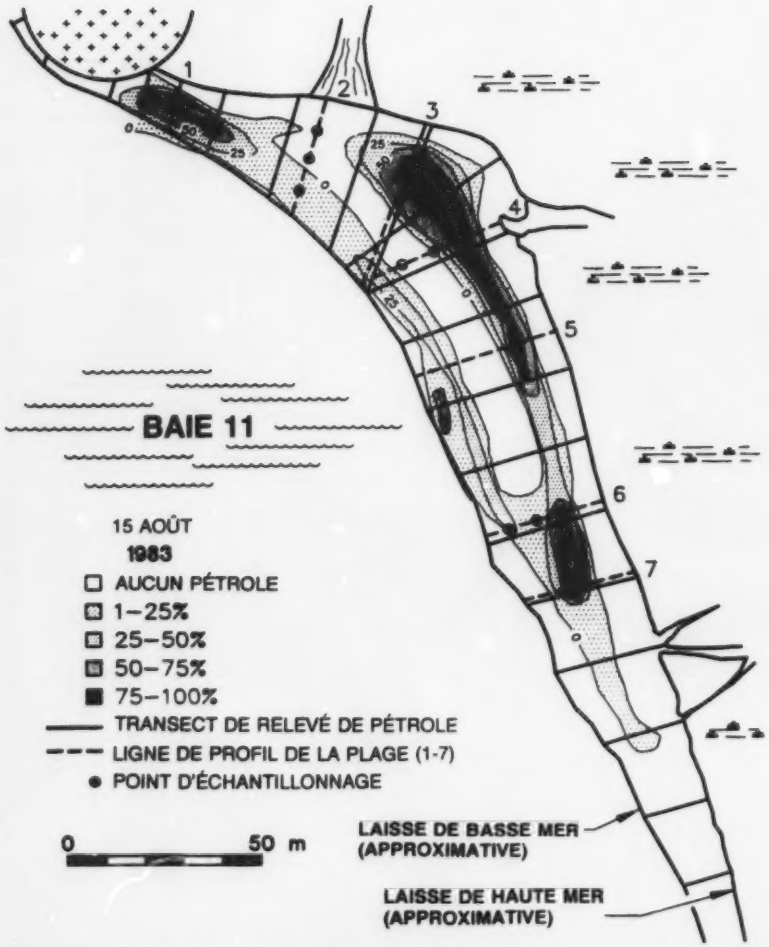


Figure 5 **Couverture mazoutée superficielle, zone intertidale de la baie 11**



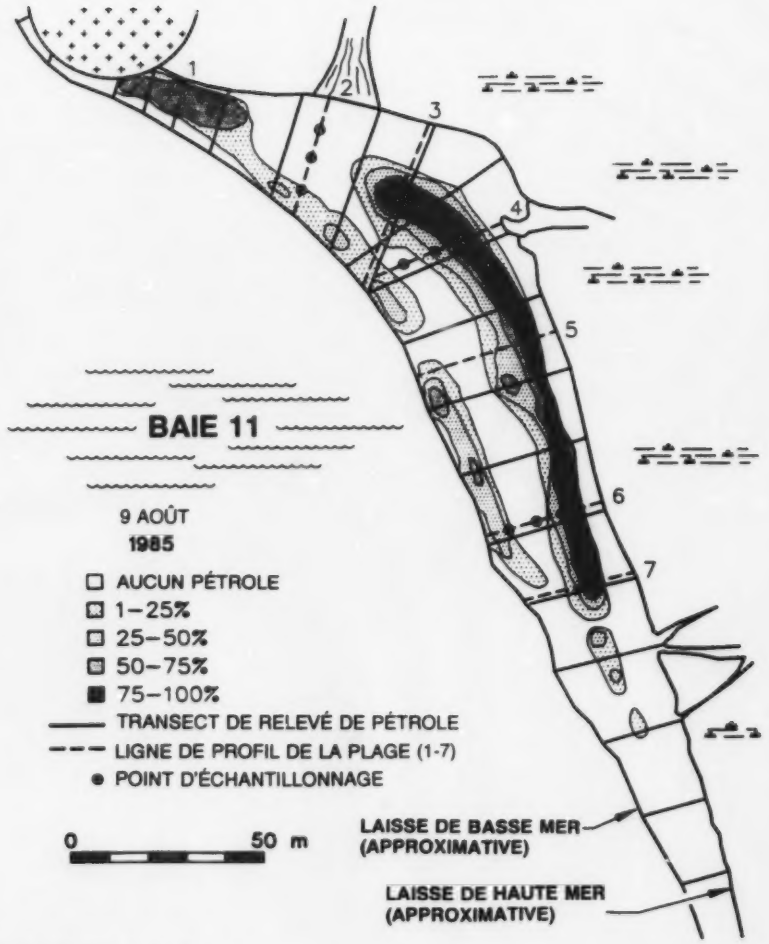


Figure 5 **Couverture mazoutée superficielle, zone intertidale de la baie 11 (suite)**

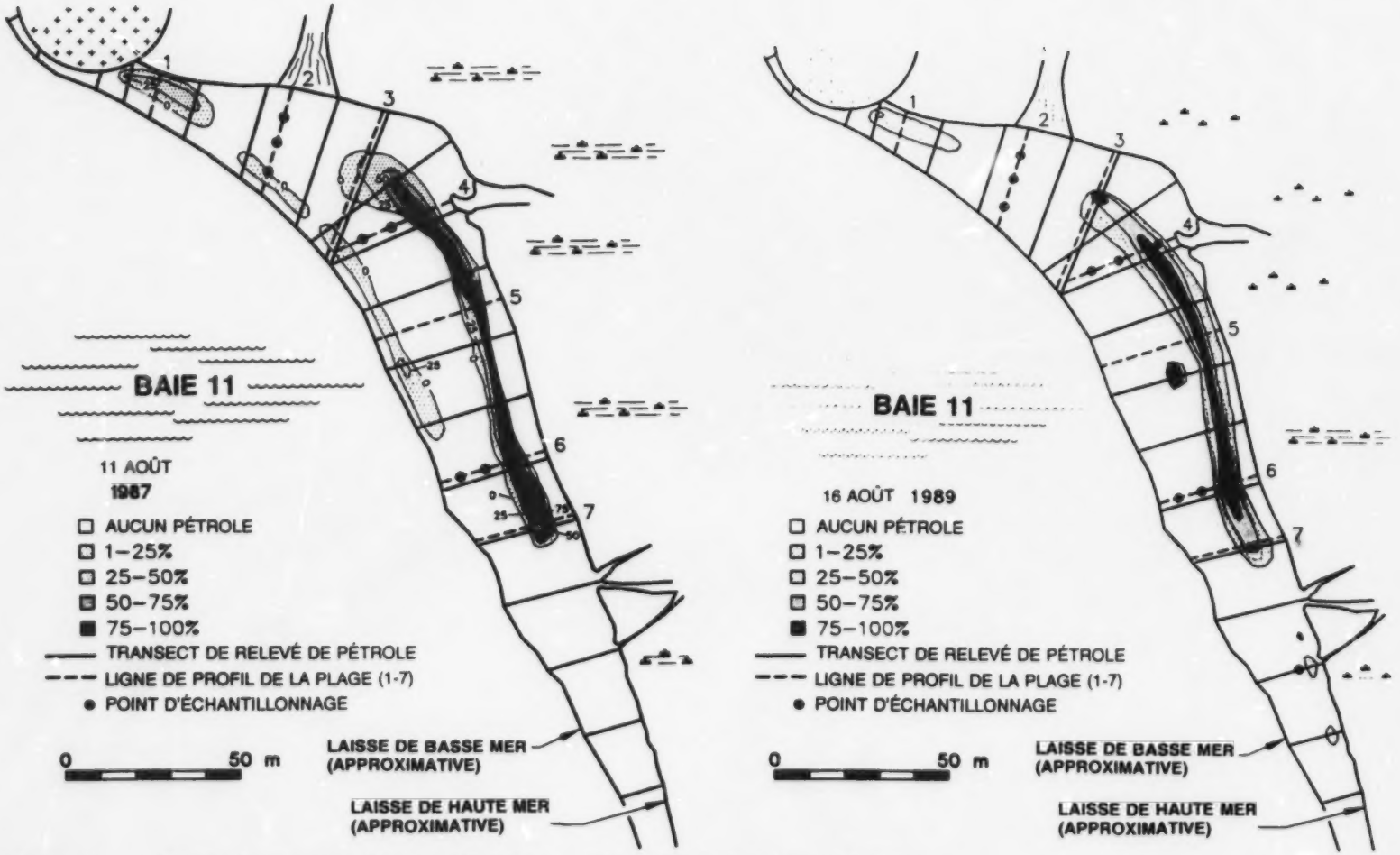


Figure 5 **Couverture mazoutée superficielle, zone intertidale de la baie 11 (suite)**

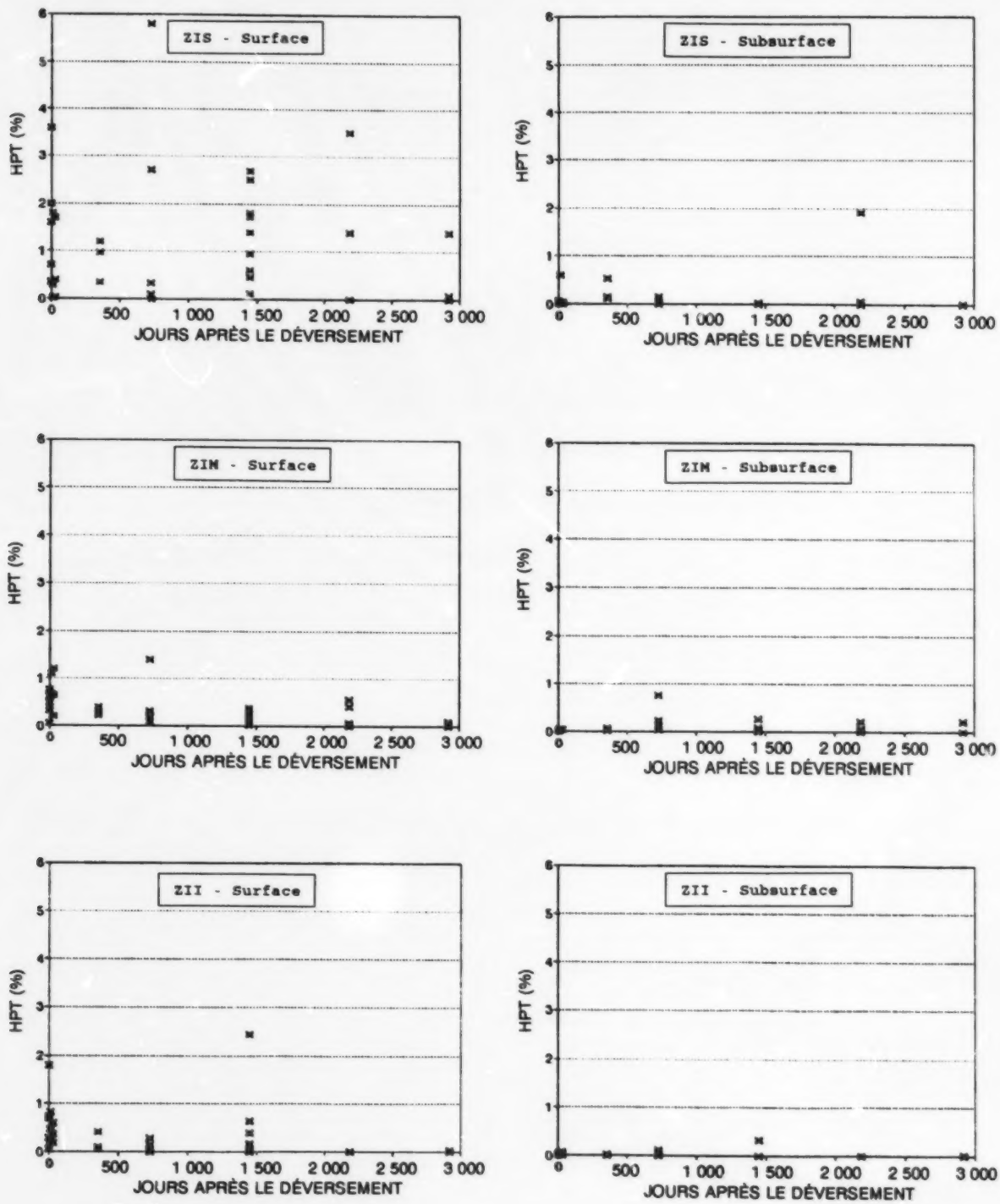


Figure 6 **Teneurs en HPT (%), zone intertidale de la baie 11 - Strates**

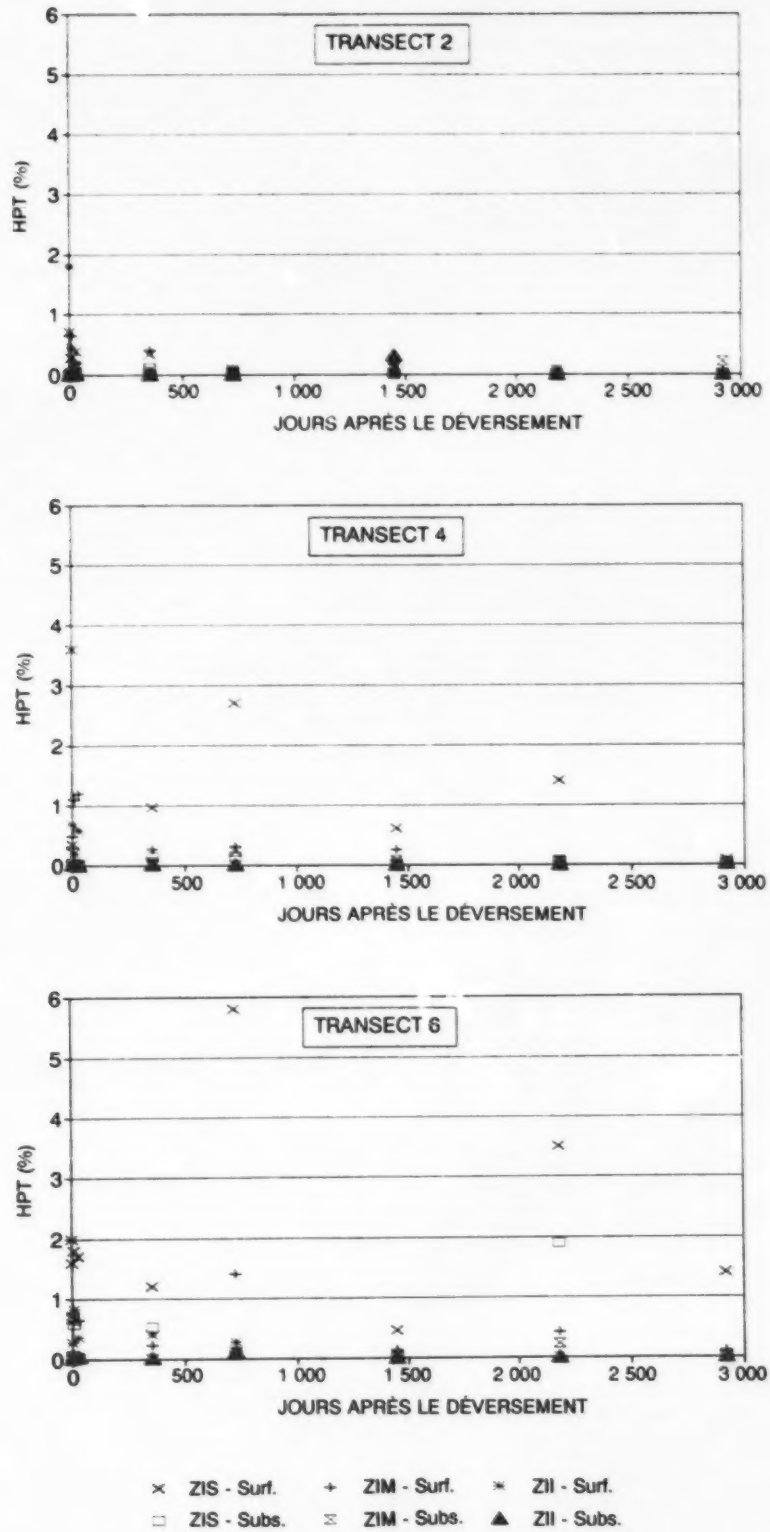


Figure 7 **Teneurs en HPT (%), zone intertidale de la baie 11 - Transects**

Tableau 11 Répartition du pétrole superficiel

ANNÉE	Répartition de la couverture mazoutée en surface, par catégorie					Superficie totale mazoutée (m^2)
	0 %	0,1 à 24 %	25 à 49 %	50 à 74 %	75 à 100 %	
1981	6 200	2 015	1 700	1 145	3 710	8 570
1982	5 170	5 200	1 775	1 320	1 305	9 600
1983	10 845	2 120	840	350	615	3 925
1985	10 330	1 830	1 440	660	510	4 440
1987	12 530	1 040	560	280	360	2 240
1989	13 170	720	26	240	380	1 600
1981 - 1989	112 %	-64 %	-98 %	-79 %	-90 %	-81 %

Tableau 12 Changements concernant l'estimation du contenu en pétrole de la plage

ANNÉE	Superficie totale mazoutée (m^2)	Superficie équivalente d'une couverture mazoutée à 100 % (m^2)	Couverture mazoutée superficielle moyenne (%)	Pourcentage mazouté de la superficie de la plage
1981	8 570	4 850	57	58
1982	9 600	3 282	34	65
1983	3 925	1 337	34	25
1985	4 440	1 200	27	30
1987	2 240	800	36	15
1989	1 600	631	41	10

Tableau 13 Teneurs moyennes de HPT (%) en surface dans la zone intertidale de la baie 11

DATE	Zone intertidale supérieure (ZIS)	Zone intertidale médiane (ZIM)	Zone intertidale inférieure (ZII)	Moyenne globale
19 août 1981	2,8	1,9	0,5	1,7
20 août 1981	0,9	0,4	0,9	0,7
28 août 1981	0,7	0,8	0,5	0,7
15 sept. 1981	0,7	0,7	0,4	0,6
10 août 1982	0,8	0,3	0,2	0,4
16 août 1983	2,9	0,6	0,1	1,2
9 août 1985	0,4	0,1	0,06	0,2
12 août 1987	1,6	0,2	<0,01	0,7
16 août 1989	0,5	0,05	0,01	0,2
Régression de 1981 à 1989- Changement annuel	<0,1 %	<0,1 %	<0,1 %	

Tableau 14 Teneurs moyennes de HPT (%) en subsurface dans la zone intertidale de la baie 11

DATE	Zone intertidale supérieure (ZIS)	Zone intertidale médiane (ZIM)	Zone intertidale inférieure (ZII)	Moyenne globale
20 août 1981	0,03	0,01	0,01	0,02
28 août 1981	0,2	0,03	0,04	0,09
15 sept. 1981	0,01	0,03	0,03	0,02
10 août 1982	0,3	0,03	0,01	0,1
16 août 1983	0,07	0,1	0,04	0,08
9 août 1985	0,01	0,04	0,1	0,05
12 août 1987	0,7	0,1	<0,1	0,3
16 août 1989	0,01	0,07	0,01	0,03
Régression de 1981 à 1989- Changement annuel	<0,1 %	<0,1 %	<0,1 %	

Tableau 15 Teneurs en HPT (%) des échantillons spéciaux - Baie 11

		SURFACE		SUBSURFACE	
	ANNÉE	n	%	n	%
Estran (revêtement bitumineux)	1983	6	2,0	6	0,1
	1985	6	1,9	5	0,6
	1987	6	1,6	3	0,7
	1989	1	1,4	3	0,01
Dépression du milieu de la plage	1983	3	0,05	3	<0,01
	1985	1	0,2	0	
	1987	3	0,3	0	
	1989	3	0,05	3	0,07
Crête inférieure de la plage	1983	4	0,8	4	0,3
	1985	3	1,2	0	
	1987	6	0,5	0	
	1989	3	0,01	3	<0,01

6.3 *Volume du pétrole*

En 1989, le volume calculé de pétrole encore présent dans les sédiments superficiels de la plage équivalait environ au dixième du volume initial de pétrole qui s'était échoué en 1981, avec de légères différences selon la méthode de calcul employée (*cf.* tableau 16).

6.4 *Ratios d'altération*

Le tableau 17 indique les ratios d'altération pour les échantillons prélevés dans la zone intertidale de la baie 11. Après la baisse initiale survenue à l'été de 1981, les RAHS sont demeurés faibles en raison de la perte par évaporation des hydrocarbures saturés n-C_{10} à n-C_{17}. Les ratios ALC/ISO ont évolué de la même façon; toutefois, dans ce cas, la principale baisse de la moyenne des ratios, attribuable à la déperdition des n-alcanes par biodégradation, s'est produite entre les échantillonnages de septembre 1981 et d'août 1982.

On observe une importante différence entre les ratios d'altération des échantillons à forte teneur en HPT (>0,5 %) et ceux des échantillons à faible teneur (<0,5 %). Comme l'indique le RAHS, la perte par évaporation est sensiblement plus faible dans les échantillons à forte teneur en HPT. On observe la même chose pour les ratios ALC/ISO et les RACA. Les chromatogrammes des échantillons à forte teneur en HPT indiquent une altération moins grande et montrent des alcanes séparés et bien résolus, à peu près à partir de C_{10} en montant, ainsi qu'un faible MCNR (mélange complexe non résolu). Par contraste, les chromatogrammes des échantillons à faible teneur en HPT indiquent une altération beaucoup plus marquée et montrent un important MCNR ainsi qu'une forte perte d'alcanes par rapport aux isoprénoïdes, même si certains alcanes peuvent être résolus. Les taux d'altération ont donc été différents selon la teneur en pétrole des sédiments.

6.5 *Revêtement bitumineux*

Le caractère de la couverture mazoutée a subi une modification importante entre le relevé de 1982 et la visite d'août 1983, soit la formation d'un revêtement bitumineux. Bien que de superficie relativement modeste (325 m^2 en 1983 et 205 m^2 en 1985), ce revêtement contenait en 1983 les deux tiers environ des sédiments mazoutés de la plage, et un tiers en 1985. En 1987, le revêtement était devenu plus discontinu et il était difficile d'en estimer la superficie et le volume. Les échantillons de revêtement présentaient des concentrations moyennes de pétrole d'environ 2,0 % en 1983 et 1985 et de 1,6 % en 1987; le seul échantillon recueilli en 1989 avait une concentration de 1,4 %. Ces échantillons étaient relativement peu altérés si on les compare aux autres types d'échantillons à faible teneur en HPT. Chaque année, les échantillons prélevés sous le revêtement présentaient une faible teneur en HPT.

6.6 *Échantillons divers*

On a prélevé à la surface des roches et analysé par CG-SM un petit nombre d'échantillons de pétrole dont l'apparence variait de noir brillant à noir mat. Tous présentaient une distribution d'hydrocarbures similaire et semblaient aussi altérés que le revêtement bitumineux. On a creusé quelques fosses et prélevé des échantillons du pétrole libre qui suintait à la surface de l'eau qui les remplissait partiellement. Le pétrole semblait frais et mobile. L'analyse par CG-SM d'un échantillon a révélé une altération relativement faible.

Tableau 16 HPT (%) et volume calculé du pétrole - Baie 11

DATE	Note	n	Teneur moyenne en HPT à la surface (%)	Volume du pétrole superficiel (m^3)	
				SME	Calculé
19 août 1981	a	6	1,7	5,3*	5,3
20 août 1981	a	9	0,7		2,2
28 août 1981	a	9	0,7		2,0
15 sept. 1981	a	9	0,6		1,8
10 août 1982	a	9	0,4	3,6	1,5
	a	9	1,2		1,6
16 août 1983	b	10	0,5		0,6
	c	19	0,8	1,5	1,1
	a	9	0,2		
9 août 1985	b	14	1,2		
	c	23	0,8	1,3	1,3
	a	8	0,7		
12 août 1987	b	21	0,6		
	c	29	0,6	0,9	0,5
16 août 1989	d	3	0,5	0,7	0,3

* On suppose que le volume initial de la SME à 100 % est le même que le volume calculé.

Notes: a : ZIS, ZIM, ZII, transects 2, 4, 6
b : échantillons spéciaux
c : a + b
d : ZIS seulement; échantillons de pétrole visible seulement.

Tableau 17 Indices d'altération moyens - Baie 11

DATE	n	RAHS	ALC/ ISO	RACA
20 août 1981	6	2,6	2,7	S.O.
15 sept. 1981	6	1,6	2,6	S.O.
10 août 1982	6	1,1	1,1	S.O.
16 août 1983	6	1,4	1,3	S.O.
9 août 1985	6	1,3	0,7	1,8
12 août 1987	4	1	1,3	S.O.
16 août 1989	10	1,2	0,05	1,3

6.7 Conclusion

6.7.1 Couverture mazoutée superficielle

Une comparaison des teneurs en HPT du pétrole superficiel et des observations visuelles de la couverture mazoutée superficielle nous force à conclure que les données sur les HPT obtenues systématiquement dans un petit nombre seulement de points d'échantillonnage ne reflètent pas les conditions de mazoutage réelles. Les cartes de la couverture mazoutée superficielle indiquent clairement que les points d'échantillonnage prédéterminés se trouvaient, d'une année à l'autre, dans des traits morphologiques différents de la plage mazoutée. La variabilité observée pour les parcelles d'arrière-plage, plus homogènes (T1 et T2), s'avère beaucoup plus élevée dans cette situation plus réaliste de mazoutage intertidal. Le nombre d'échantillons requis pour décrire statistiquement la plage dans son ensemble est très élevé, de l'ordre d'un par mètre carré, ou environ 8 000 échantillons par année pour la baie 11, d'après la variance des parcelles plus homogènes T1 et T2. C'est évidemment une quantité excessive, considérant la valeur de l'information ainsi produite. Les teneurs en HPT des échantillons superficiels, telles que déterminées par nos études, n'offrent aucun moyen de prédire les concentrations futures de pétrole ou d'esumer les tendances.

Les évaluations concernant la couverture mazoutée, la longueur mazoutée, la superficie mazoutée et le volume de pétrole présentent des seuils de confiance différents pour des niveaux d'effort différents. Le sommaire des changements, présenté au tableau 18 et à la figure 8, indique les tendances déterminées pour la baie 11. La longueur mazoutée, qui est l'élément le plus facile à déterminer, ne nous apprend rien sur la quantité de pétrole. La superficie, mesurée comme étant la superficie mazoutée totale, ne nous renseigne pas non plus sur la quantité de pétrole mais constitue une meilleure estimation que la longueur. La superficie mazoutée équivalente (SME), basée sur une estimation du pétrole présent dans une unité de superficie, donne un indice de la concentration de pétrole dans chaque unité. La variabilité observée parallèlement et perpendiculairement au littoral, qui peut être associée au type de sédiment, à la géomorphologie de la plage ou aux processus côtiers, est intégrée à un nombre représentatif de toute la plage. Le volume de pétrole dépend des teneurs en HPT à la surface et en subsurface, que l'on sait être des mesures médiocres pour une grande

Tableau 18 Sommaire des changements - Baie 11

ANNÉE	Eaux libres (mois)	Longueur du littoral mazouté (%)	Superficie mazoutée totale (%)	Superficie mazoutée équivalente (%)	Volume de pétrole calculé (%)
1981	0	100	100	100	100
1982	3	90	113	68	28
1983	5	70	45	28	21
1985	9	67	51	25	25
1987	13	58	26	16	9
1989	17	58	19	13	6

superficie (de nombreux hectares). Le volume des sédiments mazoutés repose uniquement sur les données concernant la pénétration du pétrole et constitue probablement une meilleure estimation que le volume de pétrole, quoiqu'il ne nous renseigne pas sur la quantité de pétrole.

Les données obtenues indiquent que la plage n'était pas mazoutée de façon uniforme : les trois transects étudiés différaient tant au niveau des HPT qu'au niveau des mesures visuelles. De toute évidence, une caractérisation complète de la plage exige l'examen d'un grand nombre de transects.

La figure 8 montre clairement qu'il y a eu une période initiale de changement de la superficie mazoutée et du volume de pétrole. Durant les cinq premiers mois, les processus côtiers (physiques) ont éliminé la plus grande partie du pétrole échoué. Le rythme de changement au cours des douze mois suivants a été beaucoup plus lent. On s'attend à ce que la superficie mazoutée et le volume de pétrole continuent de diminuer à ce rythme lent, à moins que quelque chose d'inhabituel ne se produise. La plage n'a pas subi d'ondes de tempête ni d'action des glaces durant la période d'étude, mais l'un ou l'autre de ces phénomènes pourrait entraîner plus de changement que les conditions environnementales «normales» observées jusqu'à maintenant. Le rythme d'élimination a changé au fil du temps à mesure qu'augmentait la viscosité du pétrole, en raison de l'altération et de l'élimination du pétrole plus accessible (superficiel). Le pétrole qui reste est altéré, quelquefois semblable à du goudron, et se trouve principalement dans les sédiments superficiels plutôt qu'à la surface de la plage.

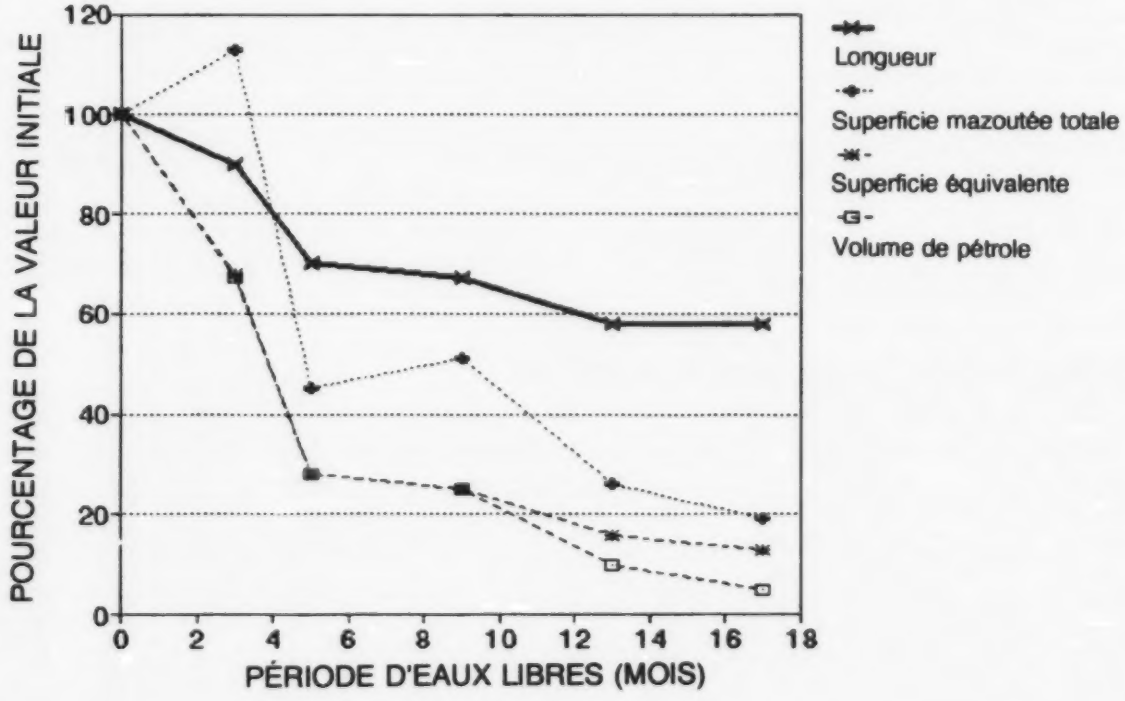


Figure 8 Changements du pétrole superficiel le long du littoral - Baie 11

6.7.2 Pétrole subsuperficiel

En général, les concentrations subsuperficielles de pétrole sont de beaucoup inférieures aux concentrations superficielles, mais elles dépendent de la composition du substrat de la plage. Près du littoral de la baie 11, les concentrations subsuperficielles de pétrole aux points de contrôle étaient beaucoup plus faibles que les concentrations superficielles aux mêmes points. La conclusion voulant que les teneurs superficielles en HPT ne décrivent pas les conditions réelles du pétrole superficiel de la plage doit donc s'appliquer également à l'emploi des HPT subsuperficiels comme indicateurs des conditions subsuperficielles. Le creusage au hasard de quelques trous sur la plage a mis au jour des sédiments mazoutés et, occasionnellement, du pétrole libre.

La plage de la baie 11 est située au pied d'un bassin versant et, durant l'été, elle est baignée d'eau douce qui emporte le pétrole, comme en témoignent les fosses qui ont été creusées ainsi que le très léger chatoiement qu'on a occasionnellement observé s'échappant dans la baie à partir de l'extrémité de la plage. Bien que mineures, ces observations indiquent la présence de pétrole dissimulé dans la plage. Une analyse compositionnelle par CG-SM a révélé que le pétrole libre était relativement frais, comme on pouvait s'y attendre.

Il est reconnu que les matériaux de plage grossiers permettent une plus grande pénétration du pétrole que les matériaux plus fins. La granulométrie des particules n'a pas été déterminée avec précision. Vu le petit nombre de points ayant fait l'objet d'un échantillonnage continu, cela n'aurait contribué qu'à compliquer davantage le problème en introduisant un paramètre supplémentaire dans une petite série de données. Les résultats obtenus ne concordent pas avec la croyance générale voulant qu'il pénètre une plus grande quantité de pétrole dans la zone intertidale supérieure que dans la zone intertidale inférieure. Ce phénomène peut être masqué par d'autres paramètres non mesurés dans notre étude.

Conclusions

Le projet de déversement de pétrole à l'île de Baffin, couplé au programme de surveillance qui l'a suivi, a généré une base de données à long terme et cohérente sur l'échouement de pétrole sur des plages arctiques. Il s'agit d'une des rares bases de données pouvant servir à prédire le sort et la persistance du pétrole échoué sur des littoraux sédimentaires grossiers en climat froid. Voici les conclusions générales qu'on peut en tirer.

Dans un scénario de déversement de pétrole typique, des quantités importantes du pétrole échoué à la surface d'une plage abritée sont éliminées par les processus environnementaux naturels. Bien que lente en temps absolu, l'élimination totale s'est avérée rapide si l'on tient compte de la brièveté des périodes où les eaux sont libres de glace, pendant lesquelles peuvent agir les processus d'auto-épuration, et de la faible énergie de la houle en cet endroit. Après huit années ou dix-sept mois d'eaux libres, de 90 à 95 % de la contamination superficielle avait disparu. Cette combinaison (faible énergie de la houle et charge de pétrole) constitue un scénario de pire éventualité pour un mazoutage unique sur une plage peu perméable en climat froid.

L'élimination naturelle du pétrole superficiel échoué dans la zone intertidale s'est faite rapidement au début, mais le rythme a beaucoup ralenti avec les réductions subséquentes de la quantité de pétrole libre non altéré. Les phénomènes d'élimination physique et d'altération du pétrole superficiel échoué ont surtout agi au cours des deux premières années. Au cinquième mois d'eaux libres, la superficie mazoutée et le volume de pétrole avaient chuté à 30 % des estimations initiales, soit une réduction moyenne de plus de 10 % par mois d'eaux libres. L'élimination s'est poursuivie par la suite (il restait de 5 à 10 % du pétrole initial à la surface après huit ans), mais le rythme de changement a fortement ralenti pour se situer à environ 1 % par mois d'eaux libres.

Après deux ans, une forte portion du pétrole intertidal résiduel était confiné dans un revêtement bitumineux. Dans la partie supérieure de la zone intertidale de la baie 11, une bande de revêtement bitumineux s'est formée après la deuxième année et était toujours présente la huitième année. Ce revêtement contenait environ 40 % du pétrole la troisième année, et environ 53 % la huitième année. La formation d'un revêtement bitumineux est un phénomène commun lors de déversements réels et ce type de revêtement résiste aux processus d'élimination naturels. On a observé ce phénomène à la suite des déversements de l'*Arrow*, du *Metula*, de l'*Amoco Cadiz*, de l'*Exxon Valdez* et d'autres déversements en eaux froides.

Après huit années, le pétrole intertidal résiduel présentait des caractéristiques physico-chimiques variées, allant d'une forme relativement fraîche jusqu'à une forme fortement altérée. En règle générale, les résidus de pétrole superficiels montraient de forts signes d'altération, en raison de leur exposition à l'air. Une bonne partie des sédiments de plage mazoutés avaient subi l'action des processus physiques. Le rythme

d'altération différait selon la teneur en pétrole des sédiments, les teneurs plus faibles en HPT étant associées à une plus grande altération. Les échantillons de revêtement bitumineux ne présentaient qu'une altération relativement faible, comparativement aux autres types d'échantillons à faible teneur en HPT. Les échantillons subsuperficiels sont demeurés relativement frais.

Le comportement du pétrole subsuperficiel demeure relativement peu connu. Il continue toutefois d'être source d'inquiétude quant à la persistance à long terme et au nettoyage du pétrole. Dans notre programme, le comportement du pétrole subsuperficiel a été peu étudié. On a trouvé du pétrole subsuperficiel frais et mobile dans des fosses creusées huit ans après le déversement, mais on n'a pu évaluer l'envergure et le degré de la contamination par des moyens visuels ou pratiques. Par conséquent, on ignore les ratios initial et actuel du pétrole superficiel par rapport au pétrole subsuperficiel. En fait, les méthodes de surveillance du pétrole subsuperficiel sont encore très peu développées. Néanmoins, les observations faites au cours du projet BIOS et à l'occasion d'autres déversements indiquent que le rythme d'altération et d'élimination naturelles est beaucoup plus lent pour le pétrole subsuperficiel que pour le pétrole superficiel. Dans certaines circonstances, cette situation pourrait créer une menace à long terme et causer une contamination continue.

La méthode de la superficie mazoutée équivalente (SME) semble offrir l'indice le plus pratique pour décrire le mazoutage du littoral et comparer les changements temporels à court et à moyen terme. Il existe plusieurs indices communément utilisés, chacun ayant des applications et des utilisations qui lui sont propres. Tous ont des limites. Par exemple, les indices de longueur mazoutée, de largeur mazoutée et de superficie mazoutée totale ne tiennent pas compte de la distribution multidimensionnelle et hétérogène du pétrole. De la même façon, il est très difficile d'obtenir des données précises sur la pénétration et la concentration du pétrole, ce qui affecte grandement le calcul de valeurs volumétriques.

On ne peut utiliser uniquement les teneurs en hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) des sédiments grossiers pour décrire la plage, mais elles peuvent servir à décrire des caractéristiques particulières de la plage. Les écarts observés dans les parcelles homogènes (T1 et T2) et la divergence évidente des teneurs en HPT de la baie 11 par rapport aux observations visuelles indiquent que les valeurs de HPT utilisées dans notre étude n'offrent pas une description statistiquement valide des parcelles ou des plages, mais qu'on peut s'en servir pour décrire certaines caractéristiques précises de la plage. Les données recueillies ne permettent de déterminer que des changements d'ordre de grandeur. Dans les plages à sédiments grossiers ou mixtes, il est probable qu'aucun niveau acceptable d'échantillonnage ne saurait donner un seuil de confiance statistique adéquat. Par conséquent, les teneurs en HPT ne peuvent suffire à caractériser les conditions de mazoutage de la plage dans ces environnements.

L'élimination naturelle du pétrole échoué sur l'arrière-plage est un processus relativement lent, qui se produit quand le pétrole est frais et exposé à l'air, en l'absence d'autres forces. Le pétrole superficiel situé dans l'arrière-plage, loin de l'influence marine et exposé à des températures inférieures à zéro pendant neuf mois chaque année, s'est évaporé durant la

première année d'exposition. Après cela, toutefois, le processus d'évaporation a ralenti au point de ne pouvoir être mesurable, laissant sur place environ la moitié du pétrole. Les concentrations de pétrole subsuperficiel sont demeurées fondamentalement stables durant toute la durée de l'expérience. Il en découle que le pétrole non exposé aux processus environnementaux dynamiques persistera durant une très longue période.

Le mélange avec le sol du pétrole superficiel frais situé dans l'arrière-plage tend à réduire le taux net d'élimination. Le processus de volatilisation naturelle par évaporation n'a pu opérer lorsque le pétrole superficiel frais a été mélangé aux sédiments subsuperficiels. Par ailleurs, on pourrait permettre à ce processus d'opérer en faisant remonter à la surface, par mélange, le pétrole subsuperficiel relativement frais.

Références

Boehm, P.D. «Chemistry 2: Hydrocarbon Chemistry - 1980 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 80-2. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 184 p. (1981).

Boehm, P.D. «Chemistry 2: Analytical Biochemistry - 1982 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 82-2. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 210 p. (1983).

Boehm, P.D., D.L. Fiest et A. Elskus. «Comparative Weathering Patterns of Hydrocarbons from the "Amoco Cadiz" Oil Spill Observed at a Variety of Coastal Environments». *Amoco Cadiz, Conséquences d'une pollution accidentelle par les hydrocarbures, Actes du Colloque international, Centre océanologique de Bretagne, Brest (France), 19-22 novembre 1979*, p. 159-173 (1981).

Boehm, P.D., D.L. Fiest et P. Hirtzer. «Chemistry 2: Analytical Biogeochemistry - 1981 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 81-2. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 354 p. (1982).

Boehm, P.D., W. Steinhauer, D. Cobb, S. Duffy et J. Brown. «Chemistry 2: Analytical Biogeochemistry - 1983 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 83-2. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 139 p. (1984).

Boehm, P.D., M.S. Steinhauer, D.R. Green, B. Fowler, B. Humphrey, D.L. Fiest et W.S. Cretney. «Comparative Fate of Chemically Dispersed and Beached Crude Oil in Subtidal Sediments of the Arctic Nearshore». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 133-148 (1987).

Brown, D.W., L.S. Ramos, A.J. Friedman et W.D. MacLeod. «Analysis of Trace Levels of Petroleum Hydrocarbons in Marine Sediments Using a Solvent/Slurry Extraction Procedure». *Trace Organic Analysis: A New Frontier in Analytical Chemistry*, Special Publication Number 519. Washington (D.C.), National Bureau of Standards, p. 161-167 (1979).

Buckley, J.R., B.R. de Lange Boom et E.M. Reimer. «The Physical Oceanography of the Cape Hatt Region, Eclipse Sound, N.W.T.», *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 20-33 (1987).

Bunch, J.N. et T. Cartier. «Microbiology 1: Effects of Petroleum Releases on the Microheterotrophic Flora of Arctic Sediments - 1983 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 83-5. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 44 p. (1984).

Cross, W.E. et D.H. Thomson. «Effects of Experimental Releases of Oil and

Dispersed Oil on Arctic Nearshore Macrobenthos. I. Infauna». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 184-200 (1987).

Cross, W.E., C.M. Martin et D.H. Thomson. «Effects of Experimental Releases of Oil and Dispersed Oil on Arctic Nearshore Macrobenthos. II. Epibenthos». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 201-210 (1987a).

Cross, W.E. R.T. Wilce et M.F. Fabijan. «Effects of Experimental Releases of Oil and Dispersed Oil on Arctic Nearshore Macrobenthos. III. Macroalgae». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 211-219 (1987b).

Dickins, D.F. «Ice Conditions at Cape Hatt, Baffin Island». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 34-41 (1987).

Dickins, D.F., D.E. Thornton et W.J. Cretney. «Design and Operation of Oil Discharge Systems and Characteristics of Oil Used in the Baffin Island Spill Project». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 100-108 (1987).

Eimhjellen, K. et K. Josefson. «Microbiology 2: Biodegradation of Stranded Oil - 1983 Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 83-6. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 58 p. (1984).

Emery, K.O. «A Simple Method of Measuring Beach Profiles». *Limnology and Oceanography*, vol. 6, p. 90-93 (1961).

Green, D.R. «Chemistry 1: Field Sampling and Environmental Chemistry - 1980 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 80-1. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 93 p. (1981).

Green, D.R., B. Humphrey et B. Fowler. «Chemistry 1: Field Sampling and Total Hydrocarbon Analysis - 1981 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 81-1. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 111 p. (1982).

Hope, D. et B. Humphrey. «Long-term Fate and Persistence of Stranded Oil at Cape Hatt, N.W.T., and from the "Amoco Cadiz" Spill - Part III», Unpublished Report No. EE-84. Ottawa (Ontario), Centre de technologie environnementale de River Road, Environnement Canada, 11 p. (1986).

Humphrey, B. «Chemistry 1: Field Sampling and Measurements - 1982 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 82-1. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 64 p. (1983) .

Humphrey, B. «Chemistry l: Field Sampling and Measurements - 1983 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 83-1. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 64 p. (1984).

Humphrey, B., P.D. Boehm, M.C. Hamilton et R.J. Norstrom. «The Fate of Chemically Dispersed and Untreated Crude Oil in Arctic Benthic Biota».

Arctic, nº 40 (supplément 1), p. 149-161 (1987a).

Humphrey, B., D.R. Green, B.R. Fowler, D. Hope et P.D. Boehm. «The Fate of Oil in the Water Column Following Experimental Oil Spills in the Arctic Marine Nearshore». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 124-132 (1987b).

Humphrey, B., G.A. Sergy et E.H. Owens. «Stranded Oil Persistence in Cold Climates». *Compte rendu : 13e Colloque technique du Programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures en mer et dans l'Arctique (AMOP), du 6 au 8 juin, Edmonton (Alberta)*, p. 401-410 (1990).

Humphrey, B., E.H. Owens et G. Sergy. «Long-term Results from the BIOS Shoreline Experiment - Surface Oil Cover». *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, March 4-7*, p. 447-452 (1991).

Meeres, L.S. «Meteorological Studies at Cape Hatt, N.W.T. in Support of the BIOS Project», *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 42-50 (1987).

Owens, E. H. «Shoreline Countermeasures - 1983 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 83-4. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 102 p. (1984a).

Owens, E. H. «Variability in Estimates of Oil Contamination in the Intertidal Zone on a Gravel Beach». *Marine Pollution Bulletin*, vol. 15, nº ll, p. 412-416 (1984b).

Owens, E.H. «Estimating and Quantifying Oil Contamination on the Shoreline». *Marine Pollution Bulletin*, vol. 18, nº 3, p. 110-118 (1987).

Owens, E.H. et J.R. Harper. «Frost Table and Thaw Depth in the Littoral Zone near Peard Bay, Alaska». *Arctic*, nº 30, p. 154-168 (1977).

Owens, E.H. et W. Robson. «The "Amoco Cadiz" Incident: Site Visits Seven Years After the Spill», Unpublished Report No. EE-63. Ottawa (Ontario), Centre de technologie environnementale de River Road, Environnement Canada, 34 p. (1985).

Owens, E.H. et W. Robson. «Field Observations of Stranded Oil in the Strait of Magellan Chile, 12 Years After the "Metula" Spill». Unpublished Report No. EE-89. Ottawa (Ontario), Centre de technologie environnementale de River Road, Environnement Canada (1987a).

Owens, E.H. et W. Robson. «Experimental Design and the Retention of Oil on Arctic Test Beaches», *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 230-243 (1987b).

Owens, E.H. et B. Humphrey. «Long-term Fate and Persistence of Stranded Oil from the BIOS Project, N.W.T., Canada and from the "Metula Spill", Tierra del Fuego, Chile, 1987 Results», Unpublished Report to Environment Canada. Edmonton (Alberta), Environnement Canada, 109 p. (1988).

Owens, E.H., J.R. Harper et C.R. Foget. «Shoreline Countermeasures - 1981 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 81-4. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 123 p. (1982).

Owens, E.H., J.R. Harper et C.R. Foget. «Shoreline Countermeasures - 1982 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 82-4. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 129 p. (1983).

Owens, E.H., D. Hope et B. Humphrey. «Long-term Fate and Persistence of Stranded Oil at Cape Hatt, N.W.T., and from the "Amoco Cadiz" Spill - Part I, Cape Hatt Shoreline Study», Unpublished Report No. EE-84. Ottawa (Ontario), Centre de technologie environnementale de River Road, Environnement Canada, 98 p. (1986a).

Owens, E.H., W. Robson et B. Humphrey. «Data on the Character of Asphalt Pavements». *Proceedings of the Ninth Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, June 10-12, Edmonton, Alberta*, p. 1-17 (1986b).

Owens, E.H., J.R. Harper, W. Robson et P.D. Boehm. «Fate and Persistence of Crude Oil Stranded on a Sheltered Beach». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 109-123 (1987a).

Owens, E.H., W. Robson, B. Humphrey, D. Hope et J.R. Harper. «The Fate of Stranded Oil Four Years After an Experimental Spill on a Sheltered Gravel Beach». *Proceedings, 1987 Oil Spill Conference, April, Baltimore, MD*, Publication No. 4452. Washington (D.C.), American Petroleum Institute, p. 473-482 (1987b).

Owens, E.H., G.A. Sergy et B. Humphrey. «The Migration of Stranded Oil From a Sheltered Beach into Adjacent Nearshore Subtidal Sediments». *Fate and Effects of Oil in Marine Ecosystems*, J. Kuiper et W.J. Van den Brink (éd.). Dordrecht (Pays-Bas), Martinus Nijhoff Publishers BV, p. 231-241 (1987c).

Owens, E.H., W. Robson et C.R. Foget. «A Field Evaluation of Selected Beach Cleaning Techniques». *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 244-257 (1987d).

Owens, E.H., W. Robson et B. Humphrey. «Observations from the "Metula" Spill 12 Years After the Incident». *Proceedings of the 10th Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, June 9-11, Edmonton, Alberta* (1987e).

Sergy, G.A. et P.J. Blackhall. «Designs and Conclusions of the Baffin Island Oil Spill Project», *Arctic*, nº 40 (supplément 1), p. 1-9 (1987).

Sergy, G.A., B. Humphrey et E.H. Owens. «On Describing and Estimating the Fate of Stranded Oil». *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, March 4-7*, p. 489-492 (1991).

Woodward-Clyde Consultants. «Shoreline Countermeasure - 1980 Study Results», Baffin Island Oil Spill (BIOS) Project Working Report 80-4. Edmonton (Alberta), Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 83 p. (1981).